

HANNO COLLABORATO A QUESTO  
NUMERO:

S. Balibar, R. Barbieri, A. Bettini,  
G. Bruni, L. Cifarelli, C. Corsaro,  
E. Fazio, P. Galeotti, F. Guerra,  
S. Longo, D. Mallamace,  
F. Mallamace, F.-L. Navarra,  
L. Ogrydziak, V. Pierron-Bohnes,  
Z. Prillinger, N. Robotti, S. Soria,  
C. Spitaleri, R. Voss

# IL NUOVO SAGGIATORE

## BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 34 • N. 3 maggio-giugno 2018 • N. 4 luglio-agosto 2018

**DIRETTORE RESPONSABILE**  
Luisa Cifarelli

**VICEDIRETTORE**  
Giuseppe Grosso

**COMITATO SCIENTIFICO**  
G. Benedek, A. Bettini,  
P. Cenci, S. Centro,  
S. Croci, R. Piazza,  
E. De Sanctis, S. Falciano,  
F. Ferroni, E. Iarocci,  
F. Palmonari, P. Picchi,  
R. A. Ricci

### SOMMARIO

- 3 **EDITORIALE**  
L. Cifarelli
- SCIENZA IN PRIMO PIANO**
- 5 **The Trojan Horse Method**  
C. Spitaleri
- 19 **The flavour puzzle and the B-decay anomalies**  
R. Barbieri
- FISICA E...**
- 25 **Liquid phase and thermodynamics of water**  
F. Mallamace, C. Corsaro, E. Fazio,  
S. Longo, D. Mallamace
- PERCORSI**
- 35 **The origins of the INFN Padua unit**  
A. Bettini
- 43 **Who discovered superfluidity?**  
S. Balibar
- 53 **Nuclear Thresholds**  
Z. Prillinger, L. Ogrydziak
- IL NOSTRO MONDO**
- 67 **104° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica**
- 68 **Programma Generale**
- 70 **Fifty years of EPS**  
R. Voss
- 74 **Il Nuovo Cimento 150, 100, 50 anni fa**  
A. Bettini
- News**
- 76 **Klaatu, Barada, Nikto: Gli stereotipi hollywoodiani della nostra professione**  
S. Soria
- 80 **INTERVISTA A Catherine Langlais**  
V. Pierron-Bohnes
- 82 **RECENSIONI(\*)**
- 82 **IN RICORDO DI(\*)**  
**O. Saavedra** (P. Galeotti)  
**A. Benvenuti** (G. Bruni, F.-L. Navarra)
- 83 **IN EVIDENZA**
- 84 **ANNUNCI**

(\*) Il testo completo è pubblicato online:  
[www.sif.it/riviste/sif/sag/recensioni](http://www.sif.it/riviste/sif/sag/recensioni)  
[www.sif.it/riviste/sif/sag/ricordo](http://www.sif.it/riviste/sif/sag/ricordo)

## MODALITÀ DI ISCRIZIONE ALLA SIF

Per iscriversi occorre presentare domanda di associazione con un breve curriculum scientifico e l'indicazione di due Soci presentatori.

La domanda di associazione può essere fatta online (oppure scaricando l'apposito modulo di associazione, pubblicato anche in questo fascicolo) all'indirizzo: <http://www.sif.it/associazione>.

La domanda verrà poi esaminata ed eventualmente approvata dal Consiglio di Presidenza.

Il pagamento della quota sociale, nei modi sotto indicati, dovrà avvenire dopo aver ricevuto comunicazione della accettazione a Socio.

## RINNOVO QUOTE SOCIALI

Il rinnovo della quota sociale può essere effettuato:

- Online nell'Area Soci del sito web della SIF; in questo caso si utilizza la carta di credito, con collegamento diretto e sicuro al sito della Banca Nazionale del Lavoro (BNL).  
*Ricordiamo che l'Area Soci è un'area protetta per accedere alla quale occorre utilizzare username e password che vengono inviati a tutti i Soci. (Per accedere agli altri servizi disponibili nell'Area Soci occorre essere Soci in regola).*
- Seguendo le modalità pubblicate in rete all'indirizzo:  
<http://www.sif.it/associazione>.  
In caso si desideri procedere anche in questo caso con la carta di credito, ricordarsi di usare l'apposito modulo debitamente compilato in tutte le sue parti.
- È anche possibile rinnovare l'associazione alla European Physical Society (EPS) attraverso le rispettive società nazionali. I Soci che desiderano pagare la propria quota di associazione all'EPS tramite la SIF possono farlo con le modalità di cui sopra. Le quote di associazione all'EPS sono pubblicate in ultima pagina e in rete allo stesso indirizzo sopraindicato.

---

## HOW TO BECOME A SIF MEMBER

To apply for membership an application form must be filled in, including a brief scientific curriculum and the signatures of two introducing Members.

The application can be filled in online or downloading the application form at the following address:

<http://en.sif.it/association>.

The application form will be examined and eventually approved by the Council. Applicants will have to pay the membership dues, as indicated in the form, only after having been informed by the Society about the acceptance of their application.

## MEMBERSHIP RENEWAL

Those who wish to renew membership, may pay dues by one of the following terms of payment:

- Online by credit card through direct connection with the bank (BNL). This service can be accessed through the Members Area of the SIF website.  
*We remind you that the Members Area is secured and can be accessed only through the username and password supplied to Members.*
- By cheque or credit card filling the payment form published on the web at the address:  
<http://en.sif.it/association>.  
In case you wish to use the credit card also in this case, make sure to fill in the form in all its parts.
- It is also possible to renew the association to the European Physical Society (EPS) through the respective national societies. Members who wish to pay the EPS association fee through SIF can do so according to the instructions above. The EPS association fees are available on the SIF website at the above-indicated address.

Cari Lettori,  
 nel 2018 ricorre l'80° anniversario del conferimento del Premio Nobel a Enrico Fermi e la SIF non poteva mancare l'occasione di celebrarlo organizzando a Varenna un altro simposio internazionale della fortunata serie *PASSION FOR PHYSICS*, su uno dei temi più affascinanti della fisica e dell'astrofisica contemporanea: *"Highlights and Perspectives in Multi-Messenger Research"*. Dal 13 al 14 luglio si sono dunque dati appuntamento a Villa Monastero, nell'Aula Fermi, i maggiori esponenti della ricerca mondiale in questo settore. Il simposio è stato incastonato tra i tradizionali corsi della *INTERNATIONAL SCHOOL OF PHYSICS ENRICO FERMI*, che quest'anno vertevano su: *"Mechanics of Earthquake Faulting"*, *"Computational Social Science and Complex Systems"* e *"Nanoscale Quantum Optics"*. Questi corsi sono risultati affollatissimi, a riprova della giusta scelta di temi e docenti, senza nulla togliere all'incanto di Villa Monastero.

Altro dato significativo del 2018 è l'aumento del numero di Soci SIF, con un incremento di circa il 15% rispetto all'anno scorso, soprattutto tra i giovani, grazie a un'accurata ed efficace campagna di reclutamento. Per quanto riguarda le domande pervenute per i numerosi Premi SIF, queste sono aumentate rispetto al 2017 di più del 50%. Anche questo è un significativo indicatore dell'attuale crescita della nostra Società.

Il 104° Congresso della SIF si svolge quest'anno presso l'Università della Calabria, ad Arcavacata di Rende, con alcune novità, a partire dalla tavola rotonda organizzata in collaborazione con la Società Francese di Fisica (SFP) su *"Physics for Development"*, specie nei paesi balcanici, mediorientali e africani, che dovrebbe coinvolgere scienziati e autorità di vari Paesi in un dibattito di notevole importanza. Da segnalare anche un'interessante tavola rotonda sulla pericolosità sismica della Calabria e la sezione parallela dedicata dalla SIF all' AISF (Associazione Italiana Studenti di Fisica). L'ormai consueto programma sociale FisicITÀ comprende una nuova edizione di *"Io dico l'Universo"*, lo spettacolo teatrale della SIF su Galilei, e numerosi altri eventi di richiamo per un pubblico di non addetti ai lavori. Infine, per tutte le congressiste e i congressisti, è stato predisposto, su iniziativa del CPO (Comitato Pari Opportunità) della SIF, uno *"Spazio Bambino"*, ossia, per la prima volta nella storia dei nostri congressi, un servizio di accoglienza per i bambini di età fino ai 12 anni durante tutta la durata dei lavori congressuali.

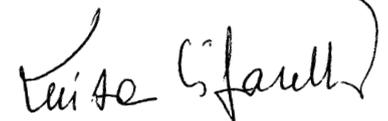
Per quanto riguarda la voce della nostra Società, la SIF sta mantenendo stretti contatti con il CUN (Consiglio Universitario Nazionale), l'ANVUR (Agenzia Nazionale della Valutazione), enti di ricerca e altre associazioni scientifiche come l'AIF (Associazione per l'Insegnamento della Fisica), la SCI (Società Chimica Italiana) o la

neonata FCF (Federazione Nazionale degli Ordini Professionali dei Chimici e dei Fisici), per una serie di questioni che riguardano il nostro mondo: la valutazione della ricerca, l'abilitazione scientifica nazionale, la professione del fisico, l'esame di maturità, ecc.

Due parole sull'attività editoriale della SIF che nel 2018 presenta, tra l'altro, la seconda edizione del volume *"Ettore Majorana – Scientific Papers"* (la raccolta completa degli articoli di Majorana, tradotti in inglese e commentati). LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO ha riscosso quest'anno un grande successo (con un IF di oltre 3.7), le riviste della serie EPJ godono tutte di ottima salute (specie EPJ PLUS), e il rilancio del *GIORNALE DI FISICA* è in pieno svolgimento.

Vorrei infine concludere parlando dell'EPS (Società Europea di Fisica). La SIF celebrerà, presso l'Università di Ginevra, il 28 settembre 2018, la fondazione della Società che li avvenne nel 1968 grazie alla lungimirante iniziativa di Gilberto Bernardini, allora Direttore della Ricerca al CERN. Questo prestigioso 50° anniversario dell'EPS è stato già marcato a mio parere dall'elezione come "President Elect" di Petra Rudolf, una donna (per la seconda volta, finalmente!) che presto si metterà alla guida della Società.

Dunque, buone notizie nel complesso. A voi tutti buon lavoro e buona lettura.




Dear Readers,  
 2018 marks the 80th anniversary of the awarding of the Nobel Prize to Enrico Fermi and the SIF could not fail to celebrate it by organizing in Varenna another international symposium of the successful series *PASSION FOR PHYSICS*, on one of the most fascinating themes of contemporary physics and astrophysics: *"Highlights and Perspectives in Multi-Messenger Research"*. From 13 to 14 July, therefore, the major experts of worldwide research in this sector met up in Villa Monastero, in the Aula Fermi. The symposium was embedded between the traditional courses of the *INTERNATIONAL SCHOOL OF PHYSICS ENRICO FERMI*, which this year focused on: *"Mechanics of Earthquake*

*Faulting"*, *"Computational Social Science and Complex Systems"* and *"Nanoscale Quantum Optics"*. These courses turned out to be very crowded, proving the right choice of themes and teachers, without taking anything away from the charm of Villa Monastero.

Another significant figure of 2018 is the increase in the number of SIF Members, an increase of about 15% compared to last year, especially among young people, thanks to a careful and effective recruitment campaign. As for the applications received for the numerous SIF Awards, these increased compared to 2017 by more than 50%. This is also a significant indicator of the current growth of our Society.

The 104th SIF Congress takes place

this year at the University of Calabria, in Arcavacata di Rende, with some news, starting from the round table organized in collaboration with the French Physical Society (SFP) on *"Physics for Development"*, especially in the Balkan, Middle Eastern and African regions, which should involve scientists and authorities from various Countries in a debate of considerable importance. Also worthy of mention are an interesting round table on the seismic hazard of Calabria and a parallel section dedicated by SIF to the AISF (Italian Association of Physics Students). The now customary social programme FisicITÀ includes a new edition of *"I say the Universe"*, the stage show of the SIF on Galilei, and

numerous other events of call for an audience of non-professionals. Finally, for all the congresswomen and congressmen, a "Child Space" was created, under the initiative of the CPO (Equal Opportunities Committee) of the SIF, i.e., for the first time in the history of our congresses, a reception service for children aged up to 12 years throughout the duration of the Congress.

As for the voice of our Society, the SIF is maintaining close contacts with the CUN (National University Council), the ANVUR (National Evaluation Agency), research institutions and other scientific associations such as the AIF (Association of Physics Teachers), the SCI (Italian Chemical Society) or the newly formed FCF (National

Federation of the Professional Bodies of Chemists and Physicists), for a series of issues affecting our community: the assessment of research, the national scientific qualification, the profession of the physicist, the high-school final examination, etc.

Two words on the publishing activity of the SIF which in 2018 presents, among other things, the second edition of the book "Ettore Majorana – Scientific Papers" (the complete collection of Majorana's articles, translated into English and commented). The review journal LA RIVISTA DEL NUOVO CIMENTO has been very successful this year (with an IF of over 3.7), the EPJ series journals all enjoy excellent health (especially EPJ PLUS), and the re-launch of the GIORNALE DI

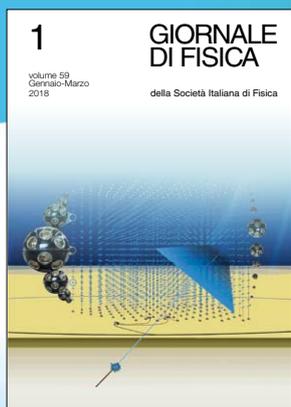
FISICA is in full swing.

Let me say a final word about the EPS (European Physical Society). The SIF will celebrate, at the University of Geneva on September 28, 2018 the foundation of the EPS which occurred there in 1968 thanks to the farsighted initiative of Gilberto Bernardini, then Research Director at CERN. This prestigious 50th anniversary of the EPS was already marked in my view by the election as "President Elect" of Petra Rudolf, a woman (for the second time, finally!) who will soon take the lead of the Society.

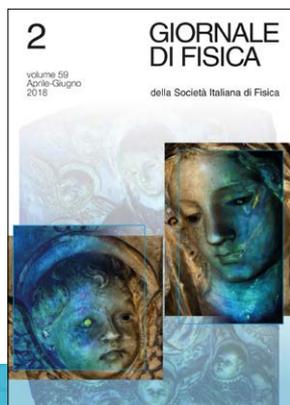
So, on the whole, good news. To you all, good luck in your work and good reading.

Luisa Cifarelli

## IL GIORNALE DI FISICA ONLINE: UNA BELLA NOVITA' PER I SOCI SIF



**Dal 2019 la SIF ha deciso di offrire a tutti i suoi soci l'accesso gratuito ai contenuti online del Giornale di Fisica.**



**Nuove rubriche, nuovi contenuti che mirano ad attirare l'interesse di un pubblico sempre più vasto oltre a insegnanti e studenti.**

**Diventa socio SIF o rinnova la tua associazione per godere anche di questo vantaggio!**

<https://www.sif.it/riviste/sif/gdf>

<https://www.sif.it/associazione>

## THE TROJAN HORSE METHOD

### A TROJAN HORSE TO REVEAL THE SECRETS OF THE STARS

CLAUDIO SPITALERI\*

INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Catania, Catania, Italy

How can one penetrate the secrets of the stars to study the nucleosynthesis of the elements? The measures of the rate of nuclear reactions that take place in the stellar plasmas constitute a very important contribution in the search for an answer. In the very frequent case of nuclear reactions between charged particles at very low energy, these simple measures become very complex or even, in many cases, impossible, because they are beyond the current experimental possibilities. To overcome these limits, in order to “look inside” the nucleosynthesis of the elements, one way is to use the method called Trojan Horse Method (THM). Today, after 24 years of research of the Nuclear Astrophysics group at the INFN-Laboratori Nazionali del Sud and of the Department of Physics and Astronomy of Catania, various measures of the bare nucleus cross sections of astrophysical interest, obtained through THM, are available to the international scientific community. This wealth of measures are a contribution to the theoretical predictions in the field of stellar evolution and have been published in the most prestigious international journals.

## IL METODO “TROJAN HORSE”

### UN CAVALLO DI TROIA PER SVELARE I SEGRETI DELLA NUCLEOSINTESI DEGLI ELEMENTI

#### 1 Introduzione

Comprendere l'origine e l'abbondanza degli elementi (fig. 1) presenti nell'Universo è stata una delle questioni scientifiche fondamentali, rivolte ai ricercatori nella fisica nucleare e nell'astrofisica nel ventunesimo secolo [1, 4]. Intimamente legata a questa problematica dello studio dell'origine degli elementi vi è non solo il problema dell'evoluzione stellare e del destino degli oggetti vicini al nostro mondo, come il nostro Sole, ma anche la stessa origine degli esseri umani.

Alcuni punti fondamentali dell'evoluzione dell'Universo possono essere sintetizzati, in base alle attuali conoscenze, dalla seguente ricostruzione scientifica. Circa un minuto dalla sua nascita, l'Universo si era già raffreddato abbastanza da produrre protoni e neutroni stabili che, tramite reazioni di fusioni nucleari, formarono principalmente nuclei atomici di deuterio, quindi quelli di elio, arrivando, con successive fusioni, a produrre nuclei di litio. Grazie alle conoscenze acquisite fin da oggi, sappiamo che pochi degli elementi, i più leggeri, sono stati prodotti, prima che le stesse stelle esistessero, nella prima fase di formazione degli elementi. Questa fase è stata chiamata *nucleosintesi primordiale*.

\*E-mail: spitaleri@lns.infn.it

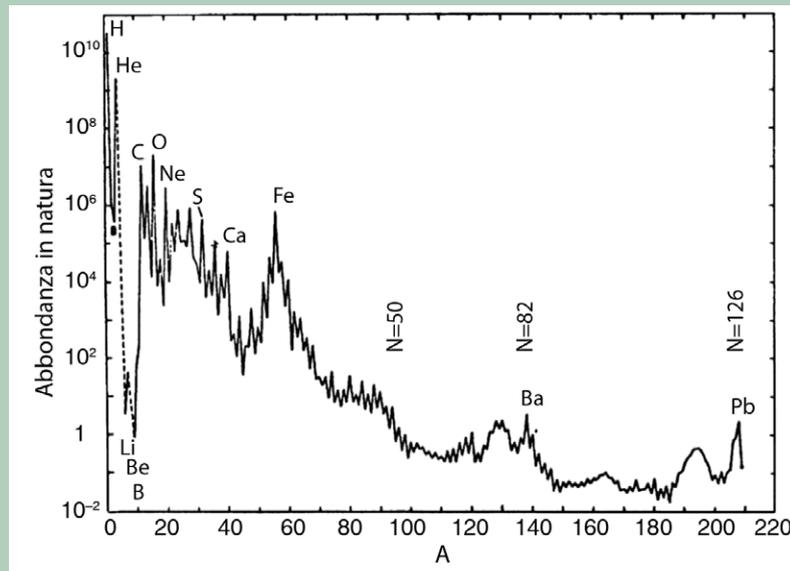


Fig. 1 Abbonanze dei vari elementi nell'atmosfera del Sole in funzione del numero di massa. L'idrogeno è l'elemento conosciuto più abbondante dell'Universo, l'elio è il secondo. Tra tutti i 92 elementi presenti naturalmente solo una piccola parte forma la quasi totalità della crosta terrestre, mentre solo 6 elementi sono presenti nella quasi totalità delle molecole degli esseri viventi: carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto, fosforo e zolfo. Di questi 6 elementi 4 di essi sono tra gli altri elementi più abbondanti nell'universo; l'idrogeno, il carbonio, l'azoto e l'ossigeno.

Dopo pochi minuti dalla formazione degli elementi più leggeri la temperatura e la densità dell'Universo diminuirono al punto da rendere impossibile altre fusioni nucleari. Questo punto è stato evidenziato dalle ricerche nel campo della fisica nucleare. I risultati di questi studi provarono la impossibilità, in natura, dell'esistenza di nuclei stabili di numero di massa  $A = 5$  o  $A = 8$ .

Come mai osserviamo attorno a noi elementi più pesanti? Il mistero di come sia avvenuto il superamento di questa mancanza di masse (5 e 8) che ha permesso la sintesi di nuclei pesanti trovò soluzione attraverso l'idea, suggerita da E. Salpeter (1951) [2], che nuclei instabili di berillio-8 ( ${}^8\text{Be}$ ) possano catturare un'altra particella alfa per formare il nucleo stabile di carbonio-12 ( ${}^{12}\text{C}$ ). Poco tempo dopo fu Hoyle (1954) [3] che ipotizzò che il processo di fusione tra nuclei di berillio-8 e particelle alfa (chiamato processo a "tre alfa") sarebbe stato in accordo con le osservazioni delle abbondanze degli elementi osservati (fig. 1) solo se fosse stato presente nel nucleo  ${}^{12}\text{C}$  uno stato risonante (chiamato dopo "Stato di Hoyle").

Oggi sappiamo che un gran numero di cicli, formati da molte differenti reazioni nucleari, sono coinvolti nella produzione degli elementi. Tra questi cicli due sono fondamentali per la nucleosintesi degli elementi e per la produzione d'energia nelle stelle [4], e quindi per la nostra stessa esistenza:

i) la catena protone-protone (catena p-p) in cui

intervengono fondamentalmente i nuclei degli elementi più leggeri come idrogeno, elio e litio, dando luogo alle reazioni della prima fase di tutti i processi di combustione degli elementi ("combustione dell'idrogeno") (fig. 2). La catena p-p costituisce la principale fonte d'energia prodotta dal Sole.

ii) il ciclo CNO in cui intervengono nuclei di carbonio, azoto, ossigeno, che avviene nelle stelle di massa più grande di quella del Sole. Grazie alle maggiori temperature di queste stelle, il  ${}^{12}\text{C}$ , già preformato, agisce da catalizzatore (fig. 3). Le reazioni del ciclo CNO producono molto più calore rispetto alle reazioni della catena protone-protone.

Dopo la formazione del  ${}^{12}\text{C}$ , la produzione degli elementi più pesanti, dal carbonio all'uranio, è potuta avvenire durante i successivi miliardi di anni durante il loro ciclo di vita, fino alla loro fase finale (*nucleosintesi stellare*).

Dalle recentissime ricerche abbiamo anche avuto conferma che buona parte degli elementi "rari e preziosi", come ad esempio, oro, platino, etc. sono stati generati dallo scontro tra due stelle di neutroni.

Per completezza aggiungiamo che parte dei più reattivi elementi tra quelli più leggeri come il litio, il berillio e il boro (Li, Be, B) sono stati anche prodotti nello spazio intergalattico da *raggi cosmici*.

La **tabella 1** sintetizza tutti i risultati, di cui noi siamo a conoscenza, sugli elementi presenti nell'Universo e i suoi siti astrofisici dove essi sono stati generati.

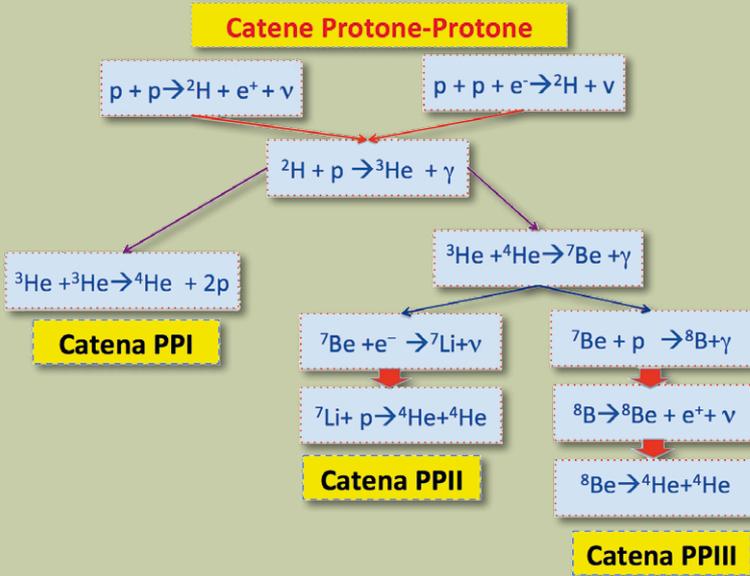


Fig. 2 Catena PPI: due protoni formano un deutone  $p + p \rightarrow d + e + \nu$ , un protone più un deutone formano un elio-3 ( ${}^3\text{He}$ ); due  ${}^3\text{He}$  formano un nucleo di elio-4 e due protoni con una produzione d'energia di circa 27 milioni di elettronvolt (MeV). Questa energia nucleare è la principale sorgente di energia che permette la nostra vita sulla Terra.

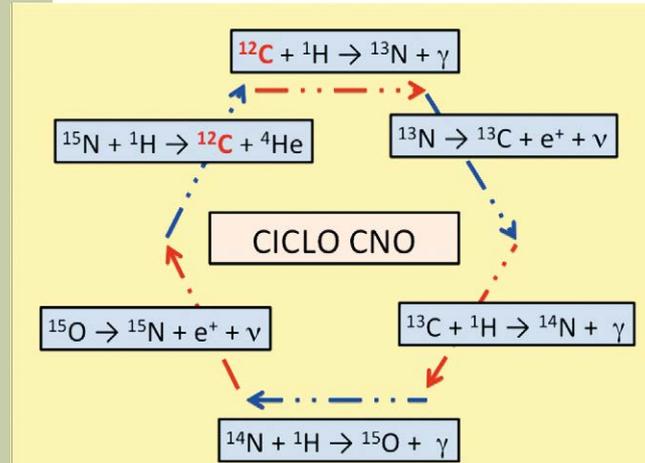


Fig. 3 Ciclo CNO: reazioni nucleari che caratterizzano il ciclo principale della catena CNO. Partendo da un nucleo di  ${}^{12}\text{C}$  attraverso 4 reazioni di fusione si ha la trasformazione di 4 protoni in un nucleo di elio ( ${}^4\text{He}$ ) e si ritorna al nucleo del  ${}^{12}\text{C}$  con una produzione di energia per ogni ciclo di circa 28 MeV.

| L'ORIGINE DEGLI ELEMENTI DEL SISTEMA SOLARE |          |          |                              |          |          |          |          |          |          |  |          |          |          |          |          |          |          |         |        |        |        |        |          |
|---|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 1<br>H                                      |          |          | Da fusioni nel Big Bang      |          |          |          |          |          |          |  |          |          |          |          |          |          |          | 2<br>He |        |        |        |        |          |
| 3<br>Li                                     | 4<br>Be  |          | Da fissioni da raggi cosmici |          |          |          |          |          |          |  |          |          |          |          |          |          |          | 5<br>B  | 6<br>C | 7<br>N | 8<br>O | 9<br>F | 10<br>Ne |
| 11<br>Na                                    | 12<br>Mg |          |                              |          |          |          |          |          |          |  |          | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P  | 16<br>S  | 17<br>Cl | 18<br>Ar |         |        |        |        |        |          |
| 19<br>K                                     | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti                     | 23<br>V  | 24<br>Cr | 25<br>Mn | 26<br>Fe | 27<br>Co | 28<br>Ni | 29<br>Cu                               | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |         |        |        |        |        |          |
| 37<br>Rb                                    | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr                     | 41<br>Nb | 42<br>Mo | 43<br>Tc | 44<br>Ru | 45<br>Rh | 46<br>Pd | 47<br>Ag                               | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I  | 54<br>Xe |         |        |        |        |        |          |
| 55<br>Cs                                    | 56<br>Ba |          | 72<br>Hf                     | 73<br>Ta | 74<br>W  | 75<br>Re | 76<br>Os | 77<br>Ir | 78<br>Pt | 79<br>Au                               | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi | 84<br>Po | 86<br>Rn | 85<br>At |         |        |        |        |        |          |
| 87<br>Fr                                    | 88<br>Ra |          |                              |          |          |          |          |          |          |  |          |          |          |          |          |          |          |         |        |        |        |        |          |
|   |          |          | 57<br>La                     | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu | 64<br>Gd                               | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er | 69<br>Tm | 70<br>Yb | 71<br>Lu |         |        |        |        |        |          |
|   |          |          | 89<br>Ac                     | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U  |          |          |          |  |          |          |          |          |          |          |          |         |        |        |        |        |          |
| Da esplosioni di stelle di grande massa     |          |          |                              |          |          |          |          |          |          | Dalla morte di stelle di piccola massa |          |          |          |          |          |          |          |         |        |        |        |        |          |
| Da fusioni di stelle di neutroni            |          |          |                              |          |          |          |          |          |          | Da esplosioni di nane bianche          |          |          |          |          |          |          |          |         |        |        |        |        |          |

Tabella 1 Origine degli elementi del sistema solare: in tabella sono riportati gli elementi chimici stabili, la loro origine e i relativi siti di produzione.

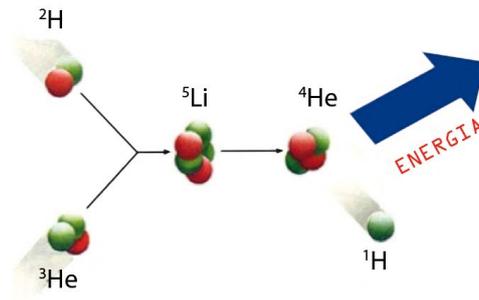


Fig. 4 Esempio di reazione di fusione nucleare esoenergetica. Il processo di trasformazione da due nuclei  ${}^3\text{He}$  e  ${}^2\text{H}$  in due altri di  ${}^4\text{He}$  e un protone (p) viene chiamato reazione nucleare. Può essere indicata come  ${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p}$ , o in forma più compatta  ${}^2\text{H} ({}^3\text{He}, \text{p}) {}^4\text{He}$ ). Dalla fusione dei nuclei  ${}^3\text{He} + {}^2\text{H}$  otteniamo una produzione d'energia di circa 18 MeV.

## 2 Come si fa a comprendere i processi che avvengono nelle stelle restando chiusi in laboratorio?

Per potere riprodurre alcune grandezze, come per esempio le sopraccitate abbondanze degli elementi presenti nell'attuale Universo osservato o porzioni di esso (fig. 1), si utilizza, in genere, una metodologia abbastanza standard in campo scientifico che consiste nel confronto tra ciò che è previsto da risultati di calcoli effettuati con opportuni codici ("previsione teorica") e quello che invece è osservato sperimentalmente ("osservazione"). Più sono piccole le incertezze sulla previsione teorica e sui dati osservativi più chiaro è il risultato. È essenziale pertanto che il lavoro dei ricercatori sia rivolto ad una progressiva minimizzazione delle incertezze.

Negli ultimi anni, grazie ai grandi progressi in campo astrofisico e tecnologico, ottenuti per esempio nell'attività di acquisizione dati attraverso telescopi e laboratori spaziali, i dati osservativi presentano incertezze sempre più piccole. In parallelo nel campo delle previsioni teoriche grandi sforzi sono stati prodotti per ridurre le incertezze sui dati nucleari sperimentali e teorici, che costituiscono parte degli input necessari per i calcoli evolutivi.

### 2.1 Quali sono gli input nucleari necessari per gli studi dei processi evolutivi stellari?

In Astrofisica Nucleare una delle principali grandezze della Fisica Nucleare applicata all'Astrofisica è la sezione d'urto di una reazione  $x+B \rightarrow C+D$ <sup>1</sup> nel plasma stellare,  $\sigma_{\text{pl}}(E)$ .

<sup>1</sup> Indichiamo con x e B due generiche particelle presenti nel plasma. Mentre indichiamo con C e D due particelle che si sono formate dopo la reazione nucleare (le particelle uscenti dalla reazione  $x+B \rightarrow C+D$ ).

Le misure delle sezioni d'urto  $\sigma_{\text{pl}}(E)$  sono necessarie

- i) Per valutare la *rate* di trasformazione (*reaction rate*)  $R(E)_{x\text{B}}$  per coppie di particelle degli elementi x e B in reazioni di fusione nucleare (fig. 4), che avvengono nel plasma stellare, per il quale si utilizza la relazione

$$(1) \quad R(E)_{x\text{B}} = \langle \sigma_{\text{pl}}(E) \cdot v_{x\text{B}} \rangle,$$

dove  $v_{x\text{B}}$  è la velocità relativa tra le due particelle x e B.

- ii) Per calcolare l'energia  $\epsilon_{x\text{B}}$ , prodotta da una coppia di particelle x e B, in una reazione di fusione termonucleare  $x+B \rightarrow C+D$  nel plasma stellare attraverso la relazione

$$\epsilon_{x\text{B}} = \langle \sigma_{\text{pl}}(E) \cdot v_{x\text{B}} \rangle Q\text{-valore},$$

dove la grandezza Q-valore indica l'energia prodotta o assorbita per ogni singola reazione<sup>2</sup>

- iii) Per misurare il tempo di vita di un elemento nel plasma stellare  $\tau_{x\text{B}}$  attraverso la relazione

$$\tau_{\text{B}}(x) = 1/[N_x \langle \sigma_{\text{pl}}(E) \cdot v_{x\text{B}} \rangle],$$

dove  $\tau_{\text{B}}(x)$  indica il tempo di vita di un nucleo x in relazione alla probabilità di reazione con un nucleo B,  $N_x$  indica il numero di nuclei del tipo x per unità di volume (vedi [5]).

Per questa ragione una buona parte dell'attività delle ricerche di Astrofisica Nucleare è costituita dalla individuazione e applicazione di metodi che possano portare alla conoscenza delle sezioni d'urto  $\sigma_{\text{pl}}(E)$ .

<sup>2</sup> Conoscendo la differenza tra le masse nel canale d'ingresso e nel canale d'uscita della reazione attraverso la famosa relazione di Einstein  $\Delta m=mc^2$ , si può ottenere l'energia E liberata per singola reazione (fig. 4).

## 2.2 Come possiamo misurare le sezioni d'urto delle reazioni in un plasma stellare?

Poiché siamo interessati a conoscere delle grandezze nucleari che caratterizzano processi che avvengono all'interno delle stelle, come possiamo arrivare a conoscere le sezioni d'urto di un processo che avviene dentro il plasma stellare? Non essendo possibile effettuare misure dirette della sezione d'urto di reazioni in un plasma stellare,  $\sigma_{\text{pl}}(E)$ , occorre individuare delle vie alternative. Una via molto utilizzata è quella di misurare, attraverso esperimenti eseguiti con acceleratori nucleari, la sezione d'urto di un nucleo nudo<sup>3</sup>  $\sigma_{\text{b}}(E)$  e quindi ottenere la sezione d'urto nel plasma  $\sigma_{\text{pl}}(E)$  servendosi della relazione

$$(2) \quad \sigma_{\text{pl}}(E) = \sigma_{\text{b}}(E) \cdot f_{\text{pl}},$$

dove  $f_{\text{pl}}$  è una grandezza chiamata "fattore di accrescimento nel plasma" dovuto alla presenza degli elettroni nel plasma stellare. Questo termine può essere fortunatamente ottenuto per via teorica attraverso la teoria di Debye-Hückel.

Un'altra possibile via, che si sta sempre più affermando, è quella di valutare il rate di reazione  $R(E)_{\text{pl}}$  direttamente in un plasma ottenuto, in modo da avere le stesse caratteristiche fisiche di quello stellare, attraverso uno o più fasci laser. Attualmente esistono nel mondo diversi laboratori (in Francia, USA, Italia, prossimamente in Romania, ecc.) che sono in grado (o saranno in grado) di produrre plasmi da utilizzare per queste misure dei rate di reazione nei plasmi  $R(E)_{\text{pl}}$ .

## 3 Perché introdurre metodi indiretti per le misure delle sezioni d'urto?

Per molte applicazioni astrofisiche, occorre conoscere la  $\sigma_{\text{pl}}(E_{\text{G}})$  all'energia di Gamow ( $E_{\text{G}}$ ).

Nelle catene di reazioni nucleari (come per esempio la catena protone-protone e i cicli CNO (fig. 2 e 3)) sono presenti in massima parte reazioni tra particelle cariche. In questi casi le misure delle  $\sigma_{\text{b}}(E)$ , attraverso esperimenti diretti, in generale sono rese molto complesse dalla presenza degli effetti legati alla repulsione della barriera coulombiana tra le particelle interagenti ed allo schermo dovuto agli elettroni (*electron screening*) dei nuclei accelerati (che in generale sono costituiti da ioni) o le targhette (che sono in generale costituite da atomi o molecole) [6, 7]. Discutiamo qui di seguito per quali motivi le misure sono più complesse.

### 3.1 Limite alle misure dirette delle sezioni d'urto: barriera coulombiana

Poiché l'energia termica  $kT$  di cui dispongono le particelle nel plasma di una stella (non in fase esplosiva) è molto più

piccola (dell'ordine di un migliaio di volte) del massimo della barriera coulombiana che si ha tra le particelle interagenti, le reazioni nucleari possono avvenire solo tramite l'effetto *tunneling*. Ciò comporta una diminuzione esponenziale della sezione d'urto  $\sigma(E)$  al decrescere dell'energia secondo la relazione

$$(3) \quad \sigma(E) \propto \exp(2\pi\eta),$$

dove  $\eta$  è il parametro di Sommerfeld,  $\eta = \frac{Z_x Z_B}{\hbar v} e^2$  che dipende dai numeri atomici  $Z_x, Z_B$  dei nuclei collidenti e dalla loro velocità relativa  $v$ .

Al decrescere dell'energia  $E$  tra i nuclei interagenti anche la  $\sigma_{\text{b}}(E)$ , in generale, decresce (eq. (3)) e quindi diminuisce (a parità di spessore di targhetta, di angolo solido ed intensità del fascio di particelle incidenti) il numero di eventi, legati alla reazione studiata, rivelati. Al limite in cui il numero di particelle diventa dello stesso ordine di quelle legate al "fondo naturale" o a quello "della reazione stessa", le difficoltà sperimentali per effettuare precise misure [5] aumentano enormemente tanto che spesso le misure delle sezioni d'urto diventano non possibili con le attuali caratteristiche tecniche degli apparati sperimentali.

### 3.2 Come possiamo misurare la sezione d'urto all'energia $E_{\text{G}}$ ?

Nei casi in cui la misura della  $\sigma_{\text{b}}(E)$  all'energia  $E_{\text{G}}$  non è realizzabile, la  $\sigma_{\text{b}}(E_{\text{G}})$ , viene ottenuta attraverso la estrapolazione dalle sezioni d'urto misurate a più alte energie.

Per rendere meno complessa la procedura di estrapolazione è stata introdotta la grandezza  $S_{\text{b}}(E)$ , chiamata fattore astrofisico (di nucleo nudo), definita dalla relazione

$$(4) \quad S_{\text{b}}(E) = E \sigma_{\text{b}}(E) \exp(2\pi\eta).$$

Il fattore astrofisico  $S_{\text{b}}(E)$ , contrariamente alla sezione d'urto  $\sigma_{\text{b}}(E)$ , ha un andamento lentamente variabile con l'energia e quindi l'estrapolazione è molto meno complessa.

Pertanto, si possono ottenere il rate di reazione  $R(E)_{\text{pl}}$  e la sezione d'urto nel plasma  $\sigma_{\text{pl}}(E)^{\text{estrap}}$  (o  $S_{\text{pl}}(E)^{\text{estrap}}$ ) dalle eq. (1), (2) e (4), se conosciamo per via teorica il "fattore di accrescimento nel plasma"  $f_{\text{pl}}$ <sup>4</sup>.

### 3.3 Il problema dell'estrapolazione

Quando il fattore astrofisico  $S_{\text{pl}}(E)$  (o la  $\sigma_{\text{pl}}(E)$ ) è ottenuto attraverso estrapolazione ( $S_{\text{b}}(E_{\text{G}})^{\text{estrap}}$ ) possono introdursi risultati non corretti a causa di possibili esistenze di risonanze non note e/o code di risonanze sotto soglia e/o code di risonanza molto larghe ad energie più alte, etc. Quindi la procedura di estrapolazione non può essere sempre

<sup>3</sup> Si definisce sezione d'urto di nucleo nudo la sezione d'urto di reazione tra i nuclei  $x$  e  $B$  considerati privi di elettroni.

<sup>4</sup> Poiché la stella evolve, cambiando l'energia del "core" e quindi anche la sua temperatura (per la relazione  $E = kT$ ), il rate di reazione  $R(E)_{\text{pl}}$  deve essere valutato per tutto un intervallo di energie (o temperature) d'interesse astrofisico.

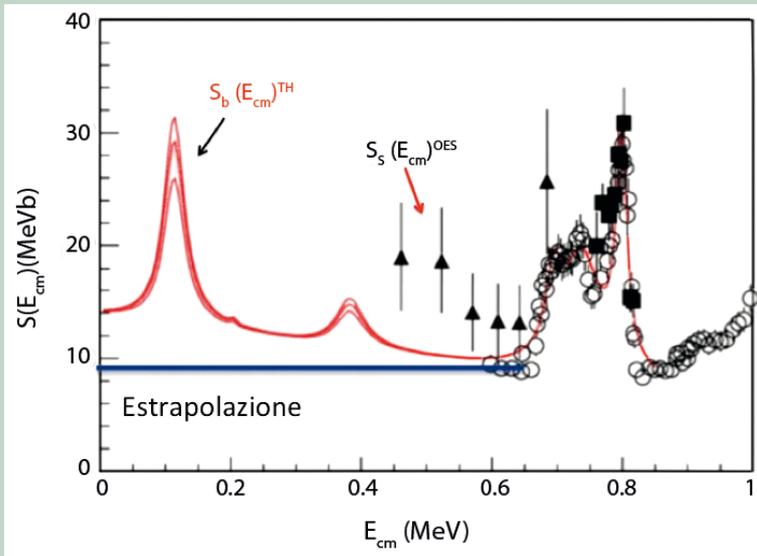


Fig. 5 Reazione  $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$  [15]. Esempio di estrapolazione del fattore astrofisico di nucleo nudo  $[S_b(E)]^{\text{estrap}}$  nel caso di una risonanza non conosciuta. Il fattore astrofisico è estrapolato dai dati, ad energie maggiori di 0.42 MeV del  $S_s(E_{\text{cm}})^{\text{OES}}$  attraverso la linea blu tracciata in figura mentre la linea di colore rosso rappresenta l'andamento sperimentale dei dati ottenuti attraverso una misura indiretta (con il Trojan Horse Method) utilizzando la reazione  $^2\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha)^{16}\text{O}n$ .

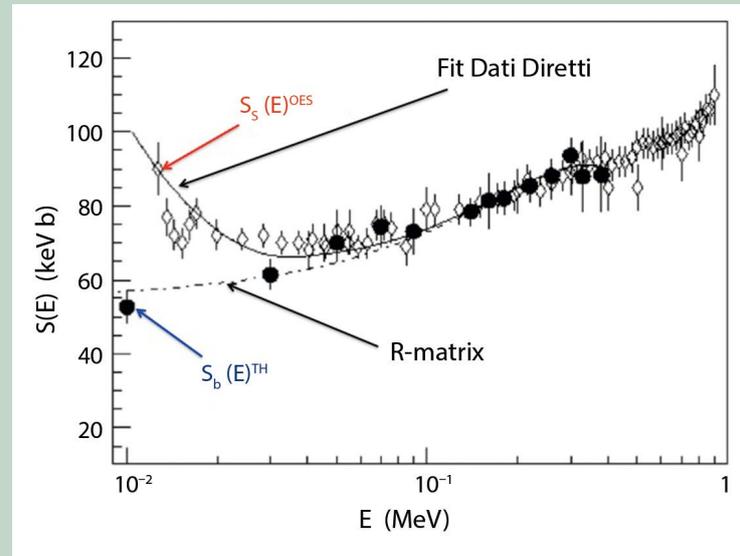


Fig. 6 Confronto dell'andamento del fattore astrofisico  $S_s(E)^{\text{OES}}$  della reazione  $^7\text{Li}(p, \alpha)^4\text{He}$  [20], ottenuto con la misura diretta (rombi vuoti) con quello  $S_b(E)^{\text{TH}}$  ottenuto in modo indiretto (punti pieni [12–14]). Il  $S_s(E)^{\text{OES}}$  presenta un andamento crescente con il decrescere dell'energia descritto dalla linea continua (fit dei dati). Questo andamento è spiegato attraverso l'effetto dello screening elettronico. Il fattore astrofisico  $S_b(E)^{\text{TH}}$  descritto attraverso i punti neri pieni mostra un andamento in accordo con l'estrapolazione dei dati diretti (linea tratteggiata) effettuata attraverso un calcolo teorico di R-Matrix. Questo è uno dei primi esempi in cui si dimostra l'assenza di effetti di screening elettronico nel THM.

considerata una soluzione affidabile per la valutazione del fattore astrofisico  $S_b(E_G)$  ad energia  $E_G$ . La fig. 5 mostra un esempio di estrapolazione con una valutazione del fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E_G)^{\text{estrap}}$  in un intervallo energetico in cui successivamente è stata evidenziata, e misurata, una nuova risonanza [8].

Per potere misurare la sezione d'urto  $S_b(E)$  all'energia  $E_G$ , evitando il problema dell'estrapolazione, la prima via utilizzata è stata quella sperimentale. A questo scopo per misurare in laboratorio le sezioni d'urto d'interesse astrofisico a più basse energie e con sempre maggiore precisione sono utilizzati laboratori "underground", collocati in gallerie o miniere di sale, che sono protetti dal fondo di particelle provenienti dallo spazio per mezzo di schermi naturali costituiti da montagne di rocce (per esempio nel caso dei Laboratori Nazionali Gran Sasso da alcune gallerie sotto il monte). In parallelo, inoltre, sono stati potenziati tutti gli apparati sperimentali sia per massimizzare l'angolo solido coperto dai rivelatori, sia per aumentare le intensità delle particelle accelerate (sviluppando e/o utilizzando nuovi acceleratori), anche attraverso sistemi magnetici ad alta soppressione che consentono di separare le particelle legate alla stessa reazione d'interesse da quelle provenienti dal fondo legato alla stessa reazione studiata.

### 3.4 Limite alle misure dirette del $S_b(E)$ : lo screening elettronico

Fin dalle prime misure del fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E)$  ottenute ad energia molto bassa (prossima anche ad  $E_G$ ), grazie ai miglioramenti sperimentali è stato evidenziato un effetto, non atteso, che portava ad un aumento del fattore astrofisico  $S_b(E)$  al decrescere dell'energia tra le particelle collidenti (fig. 6). Questo effetto, chiamato "effetto di screening elettronico", è stato attribuito alla presenza degli elettroni atomici nei nuclei interagenti [5–7].

Esso è spiegato con il fatto che le nuvole elettroniche che circondano i nuclei interagenti (che sono in effetti ioni, atomi o molecole) schermano le cariche nucleari in modo tale che la particella ("proiettile") veda una barriera di Coulomb ridotta. Questo porta, a sua volta, a una sezione d'urto per i nuclei "schermati",  $\sigma_s(E)$  (e che è lo stesso del fattore astrofisico di nucleo schermato  $S_s(E)$ ), superiore a quella che avremmo ottenuto nel caso in cui i nuclei fossero stati privi di elettroni.

Per parametrizzare questo aumento della sezione d'urto è generalmente introdotto in laboratorio un fattore di schermo elettronico,  $f_{\text{lab}}$ , definito come

$$(5) \quad f_{\text{lab}}(E) = [\sigma_s(E)/\sigma_b(E)] = [S_s(E)/S_b(E)] \sim \exp(\pi\eta ([U_e]^{\text{sper}}/E)),$$

dove  $[U]^{\text{sper}}$  è l'energia potenziale di screening elettronico [4].

A causa degli effetti dovuti allo screening elettronico,

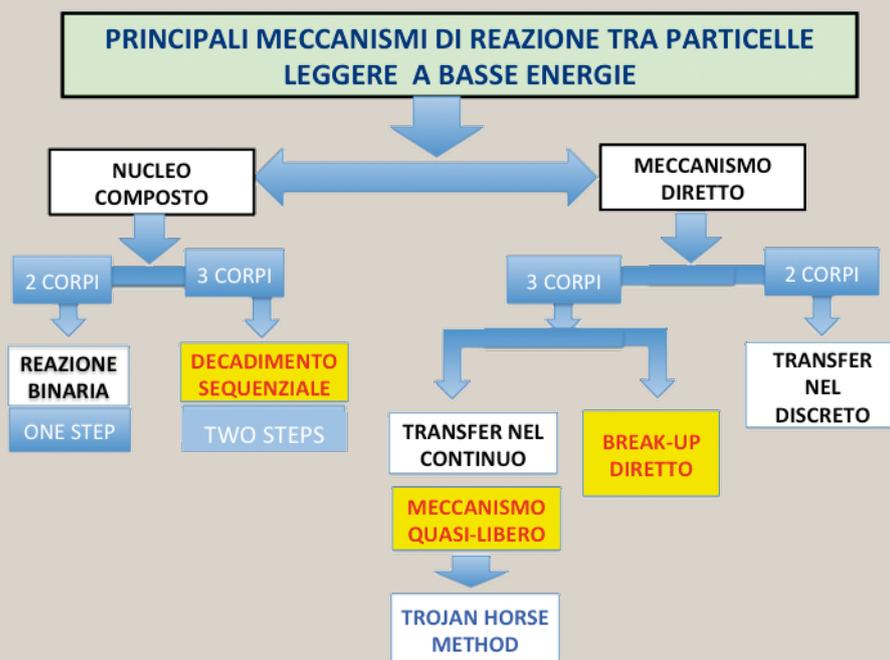


Fig. 7 Reazioni tra particelle leggere. Schema semplificato dei principali processi nucleari a bassa energia. Nei riquadri in giallo vi sono indicati i principali processi nucleari  $A+B \rightarrow C+D+S$  che portano alle stesse tre particelle  $C+D+S$ .

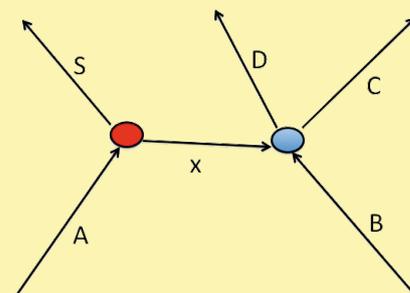


Fig. 8 Diagramma di Feynman che rappresenta il processo quasi libero  $A+B \rightarrow C+D+S$ .

in tutti i calcoli le sezioni d'urto,  $\sigma_s(E)$ , di una reazione  $x+B \rightarrow C+D$  devono essere corrette per il fattore  $f_{lab}(E)$ .

Questi effetti rimangono tuttora non totalmente compresi sia dal punto di vista teorico sia da quello sperimentale. Molti studi sono stati fatti, e continuano ad esserlo, tenendo in considerazione sia effetti legati alla perdita di energia, sia possibili contributi d'origine atomica e sia contributi dovuti alla presenza di effetti di struttura nucleare [9].

In conclusione possiamo affermare che allo stato attuale, escludendo la possibilità di calcolare il fattore di schermo elettronico in laboratorio  $f_{lab}(E)$  per via teorica, per determinare il fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E_G)$  (necessario per il calcolo del rate di reazione  $R(E)_{pl}$ ) la via comunemente utilizzabile è, ancora una volta, quella dell'estrapolazione del fattore  $S_b(E_G)$  da misure a più alta energia fino all'energia di Gamow  $E_G$ .

Per superare i limiti posti alle misure dirette, nei casi in cui sono presenti effetti di barriera coulombiana e di screening elettronico, e potere determinare senza utilizzare le procedure di estrapolazione, il rate di reazione  $R(E)_{pl}$ , la sezione d'urto di reazione  $\sigma(E)_{pl}$ , sono state introdotte e sviluppate nuove tecniche indirette di misura. Tra queste tecniche più utilizzate vi è il metodo del *Trojan Horse* (THM) (vedi ref. [8, 10–18]) di cui discuteremo in dettaglio qui di seguito.

#### 4 Il Trojan Horse Method

La fig. 7 mostra uno schema semplificato che aiuta a comprendere, nell'ambito dei principali meccanismi di reazione nucleare tra particelle leggere e a bassa energia, la collocazione del THM. Dallo schema possiamo capire che la teoria del meccanismo di reazione quasi libero, che è la base su cui poggia il THM, appartiene alla più grande famiglia dei meccanismi di reazione di tipo diretti.

Lo schema mostra che ad una reazione con due particelle (A e B) nello stato iniziale e con tre particelle (C, D e S) in quello finale (reazione  $A+B \rightarrow C+D+S$ ) possono contribuire tre meccanismi di reazioni principali che portano ad avere, nel canale di uscita, le stesse tre particelle C, D e S (caselle gialle di fig. 7).

L'idea base del THM [8, 10–18] è che si possa misurare la sezione d'urto di nucleo nudo  $\sigma_b(E_G)$  di una reazione d'interesse astrofisico (all'energia di Gamow),



attraverso la misura del contributo del processo quasi libero alla sezione d'urto di una opportuna reazione a tre corpi



Questo processo può essere descritto attraverso il diagramma di fig. 8 dove è supposto che il nucleo A abbia un'alta probabilità di potere essere descritto come formato da due cluster x e S. Il cluster x (chiamato *cluster partecipante*) interagisce con B, mentre il cluster S rimane come *spettatore* al processo di interazione tra x e B, eq. (6). Se l'energia cinetica  $E_A$  del nucleo proiettile A è più grande del massimo dell'energia della barriera coulombiana  $[B_{AB}]^{\text{coul}}$ , esistente tra le particelle A e B, il nucleo A può essere portato dentro la regione d'interazione nucleare, del nucleo B, dove può anche spezzarsi nei cluster x e S [8, 13, 16]. Se vogliamo studiare una reazione d'interesse astrofisico ad energie di Gamow la prescrizione sull'energia relativa tra il cluster x e il nucleo B,  $E_{xB}$ , è

$$(8) \quad E_{xB} < [B_{xB}]^{\text{coul}},$$

dove  $[B_{xB}]^{\text{coul}}$  è il massimo dell'energia della barriera coulombiana tra x e B.

Aiutandoci con la mitologia greca, il processo avviene come se il nucleo A agisse da *cavallo di Troia* in quanto trasporta il cluster x (*Ulisse e i guerrieri*) nella regione d'interazione nucleare del nucleo B (*dentro la città di Troia*) senza incontrare la repulsione della barriera coulombiana  $[B_{xB}]^{\text{coul}}$  (*mura fortificate*). Inoltre il cluster x, essendo già prossimo al nucleo B, può interagire con B dando luogo alla reazione a due corpi  $x+B \rightarrow C+D$  anche ad energie astrofisiche. La reazione non è influenzata dalla presenza della particella *spettatrice S* (*il cavallo di Troia senza soldati*).

L'energia tra x e B nel sistema del centro di massa  $E_{\text{cm}} (= E_{xB})$  è ottenuta da

$$(9) \quad E_{\text{cm}} = E_{\text{CD}} - Q_{(x+B \rightarrow C+D)},$$

dove  $E_{\text{CD}}$  è l'energia relativa tra le particelle uscenti C e D e  $Q_{(x+B \rightarrow C+D)}$  è il Q-valore della reazione  $x+B \rightarrow C+D$ . Selezionando opportune condizioni cinematiche tali che  $E_{\text{CD}}$  sia uguale a  $Q_{(x+B \rightarrow C+D)}$ , si ha

$$(10) \quad E_{\text{cm}} = 0.$$

Quindi, *a fortiori*, possiamo misurare la sezione d'urto  $\sigma(E)$  anche all'energia  $E_G$ .

Inoltre occorre precisare che, affinché il processo sia descrivibile attraverso un diagramma di Feynman (fig. 8), occorre selezionare i moduli degli impulsi relativi  $p_{xS}$  (tra i cluster x e S nel nucleo A) tali che sia soddisfatta la relazione

$$(11) \quad 0 \leq p_{xS} \leq k_{xS},$$

dove  $k_{xS}$  è il modulo degli impulsi relativi x-S nel caso in cui i due cluster fossero quasi non legati (*on energy shell* (OES)) [18]. Quindi ai fini dell'analisi dei dati e della selezione degli eventi occorre sempre tenere conto del limite introdotto dalla eq. (11).

La sezione d'urto della reazione  $A+B \rightarrow C+D+S$  può essere espressa, in molti casi, in approssimazione impulsiva in onda piana (PWIA) come

$$(12) \quad \frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dE_1} \propto (KF)\phi^2(p_S) \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{x+B \rightarrow C+D}^{\text{HOES}},$$

dove

- i)  $KF$  è un fattore cinematico;
- ii)  $\phi^2(p_S)$  è la distribuzione dell'impulso dello spettatore S dentro il nucleo A,
- iii)  $\left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{x+B \rightarrow C+D}^{\text{HOES}}$  è la sezione d'urto differenziale, Half Off Energy Shell (HOES), della reazione (virtuale)  $x+B \rightarrow C+D$ .

La sezione d'urto a due corpi HOES è ottenibile dall'eq. (12) se la sezione d'urto a tre corpi  $\frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dE_1}$  e la distribuzione d'impulsi sperimentale  $|\phi^2(p_{xS})|^{\text{exp}}$  sono misurate e il fattore

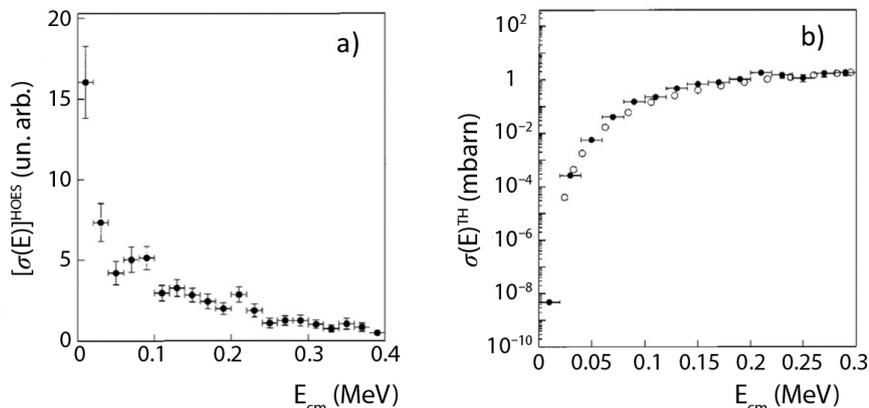


Fig. 9 Confronto tra la  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$  e la  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{TH}$  nel caso della reazione  ${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2\alpha$  studiata attraverso la reazione  ${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, \alpha\alpha)n$  [13–15]. (a) La  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$  presenta un tipico andamento crescente con la decrescita dell'energia. Questo andamento dimostra che gli effetti coulombiani, in accordo con l'ipotesi del THM di una interazione dentro il campo nucleare del  ${}^7\text{Li}$ , sono trascurabili o non presenti. (b) La stessa funzione d'eccitazione  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$  corretta per la penetrabilità  $P_l(kr)$  secondo la relazione  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{TH} = [\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES} P_l(kr)$  ha lo stesso andamento della sezione d'urto  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{OES}$  della reazione binaria  ${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2\alpha$ . Questo risultato è una condizione necessaria per l'applicabilità del THM.

cinematico  $KF$  è calcolato:

$$(13) \quad \left[ \frac{d\sigma}{d\Omega} \right]_{x+B \rightarrow C+D}^{HOES} \propto \frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dE_1} \cdot \frac{1}{(KF)[\phi^2(p_S)]_{exp}}$$

Conoscendo la distribuzione angolare della sezione d'urto in funzione dell'angolo  $[d\sigma(E, \theta_{cm})/d\Omega]^{HOES}$  d'interesse, dalla eq. (13) si ha la sezione d'urto totale  $[\sigma(E)]^{HOES}$ .

## 5 Selezione degli eventi

La selezione degli eventi è la peculiarità fondamentale dell'applicazione del THM. Dalle conoscenze attuali dei tre meccanismi di reazione (indicati con caselle in giallo in fig. 7) e utilizzando le loro proprietà, si possono trovare dei criteri che fissano delle condizioni, almeno necessarie, per la collocazione dei singoli eventi nell'ambito di ciascuno dei tre meccanismi.

Dopo la calibrazione il passo successivo è la prima selezione degli eventi compresi dentro il picco del  $Q$ -valore della reazione  $A+B \rightarrow C+D+S$ . Il secondo passo è quello di discriminare tra gli *eventi selezionati* quelli che sono anche compatibili con il meccanismo quasi libero. In questo contesto la principale grandezza *osservabile* che risulta essere molto sensibile al meccanismo di reazione è la forma della distribuzione d'impulso sperimentale  $|\phi^2(p_{x-s})|^{exp}$ . Successivamente, ricavata la sezione d'urto a due corpi (eq. (13)), occorre che siano effettuati dei test di validità. Solo allora si può usare il THM per ottenere la sezione d'urto e/o

il fattore astrofisico e/o il *rate* di reazione per l'applicazione astrofisica.

È solo grazie a questa selezione preliminare che ci è consentito di utilizzare un formalismo teorico semplificato (eq. (14)) (per maggiori dettagli vedere la ref. [8]).

## 6 Test di validità

L'equazione (12), che rappresenta il meccanismo di reazione quasi libero, ha la rimarchevole caratteristica che l'ampiezza di reazione è fattorizzabile e quindi è possibile esprimere la sezione d'urto della reazione attraverso quella di un processo virtuale  $x+B \rightarrow C+D$  (vertice colore azzurro del ramo destro del diagramma di fig. 8).

Dal confronto tra l'andamento delle sezioni d'urto  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{OES}$ , misurata attraverso una reazione binaria della reazione  $x+B \rightarrow C+D$ , e quella  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$ , si può ottenere un test di verifica della bontà del metodo indiretto utilizzato. Condizione necessaria affinché i dati della misura indiretta possano essere presi in considerazione per le successive analisi è che l'andamento dei dati estratti dalla misura diretta siano in accordo con quelli ottenuti attraverso la misura indiretta (cioè deve essere  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{TH} \propto [\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$ ) in una opportuna regione energetica in cui non siano presenti effetti di screening elettronico. Ma prima di potere effettuare questo confronto occorre considerare che la reazione è indotta dentro il campo nucleare di B, e quindi la sezione d'urto  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$  ottenuta corrisponde al solo

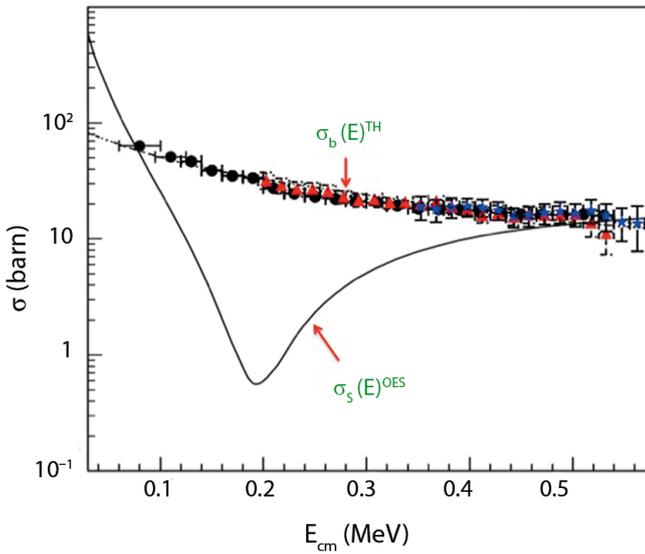


Fig. 10 Confronto tra lo scattering  $p+p \rightarrow p+p$  diretto e quello ottenuto attraverso la reazione  $p(d,p)n$  [13–15]. I punti di diverso colore rappresentano i dati sperimentali ottenuti attraverso diversi esperimenti. La linea continua mostra un “dip” nella funzione di eccitazione dello scattering  $p(p,p)p$  ottenuto attraverso misure dirette.

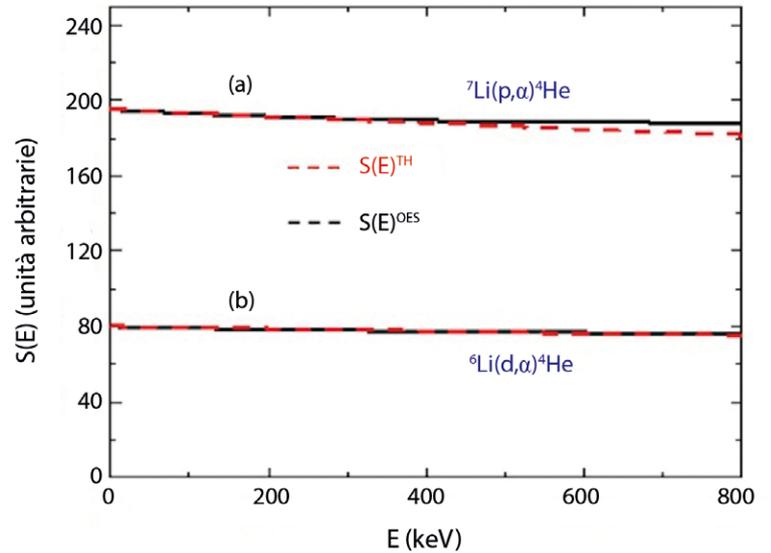


Fig. 11 Confronto tra gli andamenti del fattore astrofisico  $S(E)$  in funzione dell'energia delle reazioni  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  e  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$  studiate attraverso le reazioni binarie e quelle attraverso il THM [11]. È mostrato l'andamento in funzione dell'energia del fattore astrofisico  $[S(E)]^{\text{TH}}$  (linea tratteggiata rossa) normalizzata a quella del fattore astrofisico  $[S(E)]^{\text{OES}}$  (linea tratteggiata nera) per le reazioni: (a)  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$  e (b)  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ . Si vede che la dipendenza dall'energia, dopo la normalizzazione, nei due casi considerati è la stessa. Questo risultato conferma la validità della procedura di normalizzazione ai dati diretti utilizzata nel THM per ottenere i dati in unità assolute nei casi di andamenti non risonanti o a risonanze con gli stessi parametri.

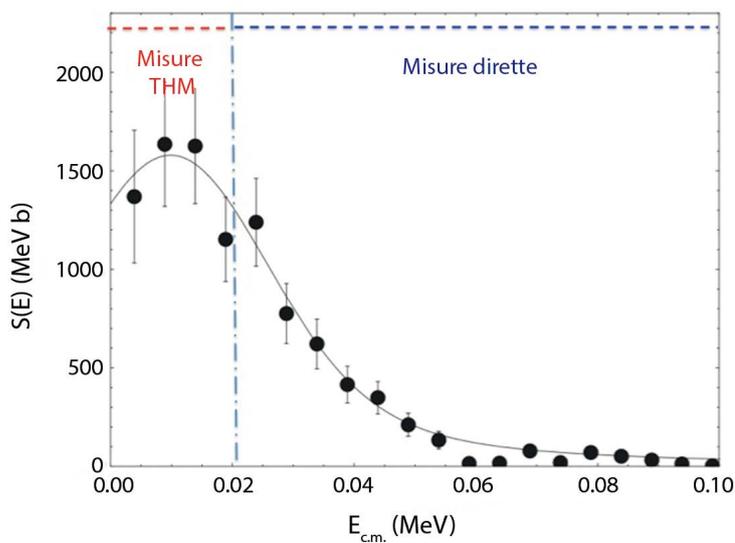


Fig. 12 Esempio di misura del fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E_G)$  all'energia di Gamow [5]. Reazione  ${}^{10}\text{B}(p, \alpha){}^7\text{Be}$  studiata attraverso la reazione  ${}^2\text{H}({}^{10}\text{B}, \alpha){}^7\text{Be}n$  ad energia  $E_{10\text{B}} = 27$  MeV. Il fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E_{\text{cm}})$  (punti neri) presenta una risonanza a 10 keV. Questa energia per una stella in fase quiescente corrisponde alla stessa energia di Gamow  $E_G$ . I dati diretti sono presenti solo fino ad un'energia di circa 22 keV [21–23].

contributo nucleare (fig. 9a). Quindi, prima di procedere al confronto occorre correggere la sezione d'urto ottenuta attraverso il meccanismo quasi libero  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES}$  introducendo la penetrabilità  $P_I$  della barriera coulombiana (fig. 9b). La sezione d'urto così ottenuta è quella che indichiamo come "sezione d'urto Trojan Horse", ed è definita dalla relazione

$$(14) \quad [\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{TH} = [\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{HOES} P_I(kr),$$

dove  $P_I$  è la probabilità di penetrazione attraverso la barriera.

Pertanto possiamo concludere affermando che la condizione necessaria per la validità della descrizione del meccanismo di reazione attraverso il diagramma di fig. 8 è che la sezione d'urto totale (o differenziale) a due corpi  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{TH}$  sia proporzionale alla sezione d'urto totale (o differenziale) della reazione binaria  $[\sigma(\theta_{cm}, E_{cm})]^{OES}$  (eq. (14)).

La fig. 10 mostra un differente test di verifica della validità del THM. L'ipotesi fondamentale del THM è che la reazione  $x+B \rightarrow C+D$  avvenga nel campo nucleare di B quindi senza contributo degli effetti coulombiani. Dal confronto tra i dati ottenuti in esperimenti diretti della sezione d'urto dello scattering elastico  $p(p,p)p$  si nota che la  $\sigma(E)_{p(p,p)p}$  mostra una netta buca, mentre i dati della  $[\sigma(E)_{p(p,p)p}]^{TH}$  ottenuti attraverso il THM mostrano un andamento lentamente variabile nella stessa regione energetica. Questo risultato è in pieno accordo con l'ipotesi del THM che la reazione ha luogo all'interno del campo nucleare del protone. Infatti se vi fossero stati effetti coulombiani sarebbe stato presente, come nel caso della misura diretta, una buca nella  $[\sigma(E)_{p(p,p)p}]^{TH}$  dovuta all'interferenza coulombiano-nucleare [8, 13, 14].

## 7 Sezione d'urto in unità assolute

La scala assoluta del fattore astrofisico di nucleo nudo  $[S_b(E)]^{TH}$  è ottenuta attraverso la normalizzazione al fattore astrofisico  $[S_b(E)]^{OES}$  della reazione binaria  $x+B \rightarrow C+D$  (misura diretta (fig. 11) [19–20]).

Quando non sono presenti dati in letteratura o nei casi in cui la funzione d'eccitazione studiata comprende la presenza di molte risonanze caratterizzate da parametri nucleari diversi tra di loro in parte o totalmente e/o effetti possibili di interferenza tra le varie risonanze, questa procedura semplice non è applicabile. In questi ultimi casi si deve utilizzare un approccio più complesso che consente attraverso il calcolo chiamato *R-matrix modificato* [8] di ottenere i valori assoluti (fig. 5).

## 8 Esempio di applicazione del THM: la reazione $^{10}\text{B}+p \rightarrow \alpha + ^7\text{Be}$

Il THM è attualmente l'unico metodo indiretto in Astrofisica Nucleare che consente, quando non è possibile con esperimenti diretti, di misurare il fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E)$  di una reazione tra le particelle cariche, ad energie di Gamow, superando il problema della criticità della procedura di estrapolazione.

Un caso di esempio di applicazione del THM è quello relativo alla misura del fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E)$  della reazione  $^{10}\text{B}+p \rightarrow \alpha + ^7\text{Be}$  [21–23]. La particolarità di questa reazione è che l'energia di Gamow è  $E_G = 10$  keV che è anche la stessa energia alla quale l'andamento del fattore astrofisico  $S_b(E)$  presenta una risonanza.

Dai dati vediamo che le misure del fattore astrofisico di nucleo schermato  $S_b(E)$  sono presenti fino a circa 22 keV e quindi non raggiungono l'energia della risonanza. Il fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E)^{estrap}$  è stato pertanto calcolato attraverso la procedura di estrapolazione. Essendo disponibili queste misure, ottenute con esperimenti diretti ad energie ultra-basse, è possibile utilizzare il fattore astrofisico di nucleo nudo ottenuto attraverso il THM per la valutazione, indispensabile per la determinazione precisa della sezione d'urto in un plasma stellare, del potenziale di screening elettronico  $[U_e]^{sper}$ , presente nelle misure di laboratorio.

| n. | Nucleo Trojan Horse | Struttura a cluster        | Energia di legame |
|----|---------------------|----------------------------|-------------------|
| 1  | d                   | p - n                      | 2,2               |
| 2  | t                   | d - n                      | 6,3               |
| 3  | $^3\text{He}$       | d - p                      | 5,5               |
| 4  | $^6\text{Li}$       | d - $\alpha$               | 1,5               |
| 5  | $^9\text{Be}$       | $^5\text{He}$ - $\alpha$   | 2,5               |
| 6  | $^{14}\text{N}$     | $^{12}\text{C}$ - d        | 10,27             |
| 7  | $^{20}\text{Ne}$    | $^{16}\text{O}$ - $\alpha$ | 4,73              |

Tabella 2 Nuclei “Trojan Horse” utilizzati negli esperimenti, strutture a cluster e energia di legame. Tutte le strutture a cluster hanno un momento relativo “l” del moto inter-cluster uguale a zero.

Infatti con il THM, utilizzando la misura indipendente del fattore astrofisico  $S_b(E)^{\text{TH}}$  del nucleo nudo e quella del fattore astrofisico  $[S_S(E)]^{\text{OES}}$  di nucleo schermato, il potenziale di screening elettronico  $[U_e]^{\text{sp}}^{\text{per}}$  può essere ricavato dalla relazione

$$(15) \quad [U_e]^{\text{sp}}^{\text{per}} = \frac{E}{\pi\eta} \ln \left( \frac{S_S(E)^{\text{OES}}}{S_b(E)^{\text{TH}}} \right).$$

In fig. 12 è mostrato il fattore astrofisico di nucleo nudo  $S_b(E)^{\text{TH}}$  ottenuto attraverso il THM. Dettagli sugli esperimenti effettuati e sulle misure del fattore astrofisico di nucleo nudo e del potenziale di screening elettronico, effettuate attraverso il THM, sono riportati nei lavori [21-23].

## 9 Esperimenti in collaborazioni nazionali ed internazionali

La tabella 2 mostra i nuclei *Trojan Horse*<sup>5</sup> utilizzati negli esperimenti indiretti (elencati in tabella 3). In base alla esperienza sullo studio dei meccanismi quasi liberi e in considerazione delle possibili reazioni d’interesse astrofisico da investigare, i nuclei *Trojan Horse* che maggiormente sono stati utilizzati sono il deutone  $d = p + n$  (reazioni n. 1-2, 4-13, 15-20), il litio-6  $^6\text{Li} = \alpha + d$  (reazioni n. 3, 14, 21, 23-25).

Qui di seguito sono elencate le principali problematiche e/o i diversi campi di applicazioni astrofisiche del THM e le indicazioni sulle relative reazioni studiate, secondo l’ordine numerico riportato nella tabella 3:

<sup>5</sup> Nella reazione a tre corpi nello stato finale  $A+B \rightarrow C+D+S$  il nucleo A, chiamato anche “nucleo Trojan Horse”, presenta una struttura a cluster del tipo  $A=x+S$ . Il cluster x può svolgere il ruolo di “cluster targhetta” o “cluster proiettile” virtuale nella reazione.

- i) *depletion* dei nuclei leggeri Li, B e Be; *Electron screening* (reazioni n. 1-7);
- ii) novae (reazioni n. 8-11);
- iii) il problema del fluoro negli AGB (reazioni n. 12-14);
- iv) BB nucleosintesi (reazioni n. 20-23);
- v) reazioni tra carbonio  $^{12}\text{C}$  e tra  $^{16}\text{O}$  (reazioni n. 25-27).

## 10 Conclusioni

### 10.1 Quali sono i vantaggi dell’utilizzo del THM?

Poiché la selezione dei dati utilizzati per l’applicazione del THM è ottenuta partendo dai dati di sezioni d’urto a tre corpi, tipicamente da un milione ad un miliardo di volte più grandi di quelle misurate nei processi diretti, si ha:

- i) Una statistica molto più alta a parità di tempo di misura. Questa caratteristica è molto importante nel caso di studio di reazioni indotte da fasci radioattivi su bersagli stabili o da fasci stabili su bersagli radioattivi.
- ii) Un tempo di misura molto più breve, in genere da due a tre settimane massimo, da confrontare con tempi dell’ordine di sei-dodici mesi, tipici delle reazioni con sezioni d’urto dell’ordine dei pico o nanobarn.
- iii) La possibilità di potere misurare la funzione d’eccitazione delle sezioni d’urto  $\sigma_b(E_G)$  e/o dei fattori astrofisici di nucleo nudo  $S_b(E_G)$  su largo intervallo di energia  $\Delta E_{\text{cm}}$  con una singola misura.
- iv) La possibilità di utilizzare apparati, di grande precisione e risoluzione, di piccole dimensioni.

### 10.2 Quali sono le prospettive di applicazione del THM?

In particolare nel caso di reazioni tra neutroni e nuclei stabili sono state utilizzate “targhette di neutroni”, ottenute con fogli di  $\text{CD}_2$  (polietilene deuterato). Tra i nuclei il deutone ha molte proprietà che lo pongono al primo posto come sorgente di protoni virtuali e neutroni virtuali (vedi tabella 3: reazioni n. 15-18).

Il THM, nella prima fase allo studio, è stato applicato per misurare le sezioni d’urto  $\sigma(E_G)$  e il fattore astrofisico  $S(E_G)$  di nucleo nudo all’energia di Gamow, di reazioni principalmente del tipo  $(p, \alpha)$  tra particelle cariche (vedi tabella 3: reazioni n. 1, 2, 4-13).

In parallelo l’uso del THM è stato esteso anche allo studio di reazioni  $(n, \alpha)$  tra nuclei stabili indotte da neutroni. Attualmente sono già iniziate misure di sezioni d’urto di reazioni indotte da fasci radioattivi su targhette di neutroni. In questo contesto sono già stati effettuati primi esperimenti di reazioni tra fasci radioattivi  $^{18}\text{F}$  e “targhette di neutroni virtuali” (reazioni n. 15-18) [24, 25].

| n. | Reazione binaria                                    | Reazione indiretta   | Acceleratore - Laboratorio                    |
|----|---|--|---|
| 1  | ${}^7\text{Li} (p, \alpha) {}^4\text{He}$           | ${}^7\text{Li} (d, \alpha\alpha) n$                                    | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
|    |   | ${}^7\text{Li} ({}^3\text{He}, \alpha\alpha) d$                        | Ciclotrone, Rez, Praga, Rep. Ceca             |
| 2  | ${}^6\text{Li} (p, \alpha) {}^3\text{He}$           | ${}^6\text{Li} (d, \alpha{}^3\text{He}) n$                             | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
|    |   | ${}^6\text{Li} ({}^3\text{He}, \alpha {}^3\text{He}) {}^2\text{H}$     | Ciclotrone, Rez, Praga, Rep. Ceca             |
| 3  | ${}^6\text{Li} (d, \alpha) {}^4\text{He}$           | ${}^6\text{Li} ({}^6\text{Li}, \alpha\alpha) {}^4\text{He}$            | Tandem, Demokritos, Atene, Grecia             |
|    |   |  | Tandem, IRB, Zagabria, Croazia                |
| 4  | ${}^9\text{Be} (p, \alpha) {}^6\text{Li}$           | ${}^9\text{Be} (d, \alpha {}^6\text{Li}) n$                            | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
|    |   |  | Tandem, CIAE, Pechino, Cina                   |
| 5  | ${}^9\text{Be} (p, d) {}^8\text{Be}$                | ${}^9\text{Be} (d, d {}^8\text{Be}) n$                                 | Tandem, CIAE, Pechino, Cina                   |
| 6  | ${}^{10}\text{Be} (p, \alpha_0) {}^6\text{Be}$      | ${}^{10}\text{B} (d, \alpha {}^7\text{Be}) n$                          | Tandem, Università San Paolo, Brasile         |
|    |   |  | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 7  | ${}^{11}\text{B} (p, \alpha_0) {}^8\text{Be}$       | ${}^{11}\text{B} (d, \alpha {}^7\text{Be}) n$                          | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 8  | ${}^{15}\text{N} (p, \alpha_0) {}^{12}\text{C}$     | ${}^2\text{H} ({}^{15}\text{N}, \alpha {}^{12}\text{C}) n$             | Ciclotrone, TAMU, College Station, Texas, USA |
|    |   |  | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 9  | ${}^{17}\text{O} (p, \alpha_0) {}^{14}\text{N}$     | ${}^2\text{H} ({}^{17}\text{O}, \alpha {}^{14}\text{N}) n$             | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
|    |   |  | Tandem, Notre Dame, Indiana, USA              |
| 10 | ${}^{18}\text{O} (p, \alpha_0) {}^{15}\text{N}$     | ${}^2\text{H} ({}^{18}\text{O}, \alpha {}^{15}\text{N}) n$             | Ciclotrone, TAMU, College Station, Texas, USA |
|    |   |  | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 11 | ${}^{18}\text{F} (p, \alpha_0) {}^{15}\text{O}$     | ${}^2\text{H} ({}^{18}\text{F}, \alpha {}^{15}\text{O}) n$             | Ciclotrone, CNS_RIKEN, Giappone               |
|    |   |  | Ciclotrone, TAMU, College Station, Texas, USA |
| 12 | ${}^{19}\text{F} (p, \alpha_0) {}^{16}\text{O}$     | ${}^2\text{H} ({}^{19}\text{F}, \alpha {}^{16}\text{O}) n$             | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 13 | ${}^{19}\text{F} (p, \alpha_{0,1}) {}^{16}\text{O}$ | ${}^2\text{H} ({}^{19}\text{F}, \alpha {}^{16}\text{O}) n$             | Tandem, INFN-LNL, Legnaro, Italia             |
| 14 | ${}^{19}\text{F} (\alpha, p) {}^{22}\text{Ne}$      | ${}^6\text{Li} ({}^{19}\text{F}, p {}^{22}\text{Ne}) {}^2\text{H}$     | Tandem, IRB, Zagabria, Croazia                |
| 15 | ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$            | ${}^2\text{H} ({}^6\text{Li}, {}^3\text{H}\alpha) {}^1\text{H}$        | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 16 | ${}^{17}\text{O} (n, \alpha_0) {}^{14}\text{C}$     | ${}^{17}\text{O} (d, \alpha_0 {}^{14}\text{C}) {}^1\text{H}$           | Tandem, Notre Dame, Indiana, USA              |
| 17 | ${}^{10}\text{B} (n, \alpha) {}^7\text{Li}$         | ${}^{10}\text{B} (d, \alpha {}^7\text{Li}) {}^1\text{H}$               | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 18 | ${}^{18}\text{F} (n, \alpha_0) {}^{15}\text{N}$     | ${}^2\text{H} ({}^{18}\text{F}, \alpha {}^{15}\text{N}) {}^1\text{H}$  | Ciclotrone, CNS_RIKEN, Giappone               |
| 19 | $p (p, p) p$  | $p (d, pp) n$  | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
|    |   |  | Ciclotrone, Atomki, Debrecen, Ungheria        |
|    |   |  | Tandem, IRB, Zagabria, Croazia                |
|    |   |  | Tandem, Università di Napoli, Italia          |
| 20 | $d (d, t) p$  | $d ({}^3\text{He}, tp) p$  | Ciclotrone, Rez, Praga, Rep. Ceca             |
| 21 | $d (d, t) p$  | $d ({}^6\text{Li}, tp) {}^4\text{He}$                                  | Dinamitron, DTL, Bochum, Germania             |
| 22 | $d (d, {}^3\text{He}) n$                            | $d ({}^3\text{He}, n{}^3\text{He}) p$                                  | Ciclotrone, Rez, Praga, Rep. Ceca             |
| 23 | ${}^3\text{He} (d, \alpha) {}^1\text{H}$            | ${}^6\text{Li} ({}^3\text{He}, p {}^4\text{He}) {}^4\text{He}$         | Dinamitron, DTL, Bochum, Germania             |
| 24 | ${}^{13}\text{C} (\alpha, n) {}^{16}\text{O}$       | ${}^{13}\text{C} ({}^6\text{Li}, n {}^{16}\text{O}) {}^2\text{H}$      | Tandem, FSU, Tallahassee, Florida, USA        |
| 25 | ${}^{12}\text{C} (\alpha, \alpha) {}^{12}\text{C}$  | ${}^{12}\text{C} ({}^6\text{Li}, \alpha {}^{12}\text{C}) {}^2\text{H}$ | Dinamitron, DTL, Bochum, Germania             |
| 26 | ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$                 | ${}^{12}\text{C} + {}^{14}\text{N}$                                    | Tandem, INFN-LNS, Catania, Italia             |
| 27 | ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O}$                 | ${}^{16}\text{O} + {}^{20}\text{Ne}$                                   | Ciclotrone, HIL, Varsavia, Polonia            |
|    |   |  | Tandem, INR, Astana, Kazakistan               |

Tabella 3 Reazioni d'interesse astrofisico studiate con il metodo del THM, reazioni indirette utilizzate, tipo di acceleratore utilizzato per gli esperimenti e laboratorio dove si sono effettuate le misure.

Più di recente è iniziata l'applicazione del THM per accedere a regioni energetiche che erano state finora inesplorate, per lo studio di reazioni di fondamentale interesse astrofisico in cui sono coinvolti nuclei più pesanti quale l'ossigeno e il carbonio. Questi esperimenti hanno portato alla misura di sezioni d'urto in reazioni tra ioni pesanti  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  e  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  fondamentali per comprendere le fasi finali dell'evoluzione di una stella. In particolare i risultati della misura dei canali di reazioni della  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  hanno suscitato l'interesse della

comunità scientifica internazionale ed i risultati appariranno nella prestigiosa rivista internazionale *Nature* (per dettagli ref. [26]). I dati relativi alla seconda reazione sono in corso di elaborazione e si spera di poterli presentare entro quest'anno.

Una descrizione più ampia delle singole applicazioni astrofisiche con il THM si può trovare negli articoli di "review" riportati in bibliografia.

## Bibliografia

- [1] G. Gamow, M. Schoenberg, *Phys. Rev.*, 58 (1940) 1117.
- [2] E. Salpeter, *Astrophys. J.*, 115 (1951) 326.
- [3] F. Hoyle, *Astrophys. J. Suppl.*, 1 (1954) 121.
- [4] M. Barbidge, G. R. Barbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.*, 29 (1957) 547.
- [5] C. E. Rolfs, W. S. Rodney, *Cauldrons in the Cosmos* (University of Chicago Press, Chicago) 1988.
- [6] H. J. Assembaum, K. Langanke, C. Rolfs, *Z. Phys.*, A 327 (1987) 461.
- [7] F. Strieder, C. Rolfs, C. Spitaleri, P. Corvisiero, *Naturwiss.*, 88 (2001) 461.
- [8] R. E. Tribble, C. Bertulani, M. La Cognata, A. Mukhamedzhanov, C. Spitaleri, *Rep. Progr. Phys.*, 77 (2014) 106901.
- [9] C. Spitaleri, C. A. Bertulani, L. Fortunato, A. Vitturi, *Phys. Lett. B*, 755 (2016) 275.
- [10] C. Spitaleri, *Nucl. Phys. News*, 19 (2009) 32.
- [11] A. M. Mukhamedzhanov, L. D. Blokhintsev, B. F. Irgaziev *et al.*, *J. Phys. G.*, 35 (2008) 014016.
- [12] A. G. Adelberger *et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, 83 (2011) 195245.
- [13] C. Spitaleri, M. La Cognata, L. Lamia, A. M. Mukhamedzhanov, R. G. Pizzone, *Phys. Atom. Nucl.*, 74 (2011) 1725.
- [14] C. Spitaleri, in *From the Big Bang to the Nucleosynthesis*, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course CLXXVIII, edited by A. Bracco, E. Nappi (IOS Press, Amsterdam; SIF, Bologna) 2011, p. 333.
- [15] C. Spitaleri, M. La Cognata, L. Lamia, A. M. Mukhamedzhanov, R. G. Pizzone, *Eur. Phys. J. A*, 52 (2016) 77.
- [16] G. Baur, *Phys. Lett. B*, 178 (1986) 135.
- [17] S. Typel, G. Baur, *Ann. Phys. (NY)* 305 (2003) 228.
- [18] I. S. Shapiro, in *Interaction of High-Energy Particles with Nuclei*, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course XXXVIII, edited by T. E. O. Ericson (1966).
- [19] C. Angulo *et al.*, *Nucl. Phys. A*, 656 (1999) 3.
- [20] S. Engstler, A. Krass, K. Neldner *et al.*, *Phys. Lett. B*, 279 (1992) 20.
- [21] C. Spitaleri, L. Lamia, S. M. R. Puglia *et al.*, *Phys. Rev. C*, 90 (2014) 035801.
- [22] C. Spitaleri, S. M. R. Puglia, M. La Cognata *et al.*, *Phys. Rev. C*, 95 (2017) 035801.
- [23] A. Cvetinović, C. Spitaleri, R. Sparta *et al.*, *Phys. Rev. C*, 97 (2018) 065801.
- [24] S. Cherubini, M. Gulino, C. Spitaleri *et al.*, *Phys. Rev. C*, 92 (2015) 015805.
- [25] R. G. Pizzone, G. D'Agata, M. La Cognata *et al.*, *Astrophys. J.*, 836 (2017) 57.
- [26] A. Tumino, C. Spitaleri, M. La Cognata *et al.*, *Nature*, 557 (2018) 687.

## Claudio Spitaleri

Claudio Spitaleri è nato nel 1945 ad Adrano (Catania). Laureato in Fisica (Nucleare) nell'anno accademico 1969-70 all'Università degli Studi di Catania, è stato Assistente Ordinario, Professore Associato e Professore Ordinario di Fisica Generale, Sperimentale e Astrofisica Nucleare a Catania. Attualmente è Ricercatore Associato all'INFN-LNS come Scienziato Emerito. Attivo da oltre 45 anni in collaborazioni scientifiche internazionali sia nel campo dei meccanismi di reazioni nucleari a basse energia sia nel campo dell'Astrofisica Nucleare, è stato responsabile nazionale (dal 1992 al 2012) del primo esperimento di Astrofisica Nucleare dell'INFN. Ha formato un numeroso gruppo di ricercatori, molti fin dal Dottorato di Ricerca, ed introdotto con il gruppo di ricerca, in campo scientifico internazionale, il Trojan Horse Method. Autore di circa 350 pubblicazioni su riviste internazionali, organizzatore e Direttore della Scuola di "Astrofisica Nucleare di Santa Tecla" (attualmente alla IX edizione), ha organizzato la prima Conferenza Nazionale dei Gruppi Italiani di Astrofisica Nucleare Teorica e Applicata (attualmente alla X edizione). È membro di numerosi comitati internazionali di conferenze di Fisica Nucleare e Astrofisica Nucleare, in particolare è stato Chair della "Nucleus Nucleus" (2015) e chair della "Nuclear Physics in Astrophysics" (2017).

## THE FLAVOUR PUZZLE AND THE B-DECAY ANOMALIES

**RICCARDO BARBIERI**

*Scuola Normale Superiore, Pisa, Italy*

*INFN, Pisa, Italy*

With the exception of the massless photon and gluon, the Standard Model cannot predict the masses of any of its particles. In the fermions this limitation extends to the mixing angles as well, making altogether the "flavour puzzle". Without considering the neutrinos, fermion masses and mixings respect an approximate  $U(2)^5$  flavour symmetry. This same symmetry could have kept hidden so far possible deviations, relative to the SM, produced by whatever new interaction with suitable  $U(2)^5$  properties. If confirmed by further data, the putative anomalies in B-meson decays apparently emerging in the last few years may be the first sign of one such new interaction and perhaps give more insight into the flavour puzzle itself.

### 1 Introduction and the flavour puzzle

At the end of 1973 the Standard Model (SM) of elementary particles was fully formulated, with many different contributions put together in its Lagrangian and its particle content. An effective, although partial, way to see the progress that has been made since then to compare the SM with observations is illustrated in [fig. 1](#), which shows all the particles of the SM with the dates of their experimental discoveries. Only less than half of these particles had been seen by the end of 1973, whereas the table was filled up in 2012 with the discovery of the Higgs boson [1, 2]. What the figure does not show is the amount of experimental results that have so far confirmed all the interactions contained in the SM Lagrangian, both in the extension of their manifestations as in the precision of the corresponding predictions.

The true paradox is that, in spite of these clear successes, there are reasons to think that the SM is not a complete theory. To justify this statement one normally quotes two different orders of reasons: i) phenomena non accounted for, like Dark Matter or the generation of the matter-antimatter asymmetry or neutrino masses; ii) phenomena included in a conceptually unsatisfactory way. In my own view the second reason is as important as the first one, with the spectrum and the mixings of the spin-1/2 constituents of matter as one of the main issues.

In the SM the differences between the quarks and leptons with the same gauge quantum numbers, colour, weak and electric charges (the vertical columns in the  $J = 1/2$  particles of [fig. 1](#) with three elements each) are exclusively attributed to their Yukawa interactions with the Higgs boson. The main consequences of this picture can be summarized as follows:

- The interactions of quarks and leptons with the gauge bosons (the  $J = 1$  particles) are "universal", *i.e.* described by flavour-independent gauge couplings.

|           |                   |               |               |                    |                |
|-----------|-------------------|---------------|---------------|--------------------|----------------|
| $J = 0$   | $h(2012)$         |               |               |                    |                |
|           | $u(1968)$         | $d(1968)$     | $e(1897)$     | $\nu_e(1956)$      | $i = 1$        |
| $J = 1/2$ | $c(1974)$         | $s(1968)$     | $\mu(1937)$   | $\nu_\mu(1962)$    | $\leftarrow 2$ |
|           | $t(1994)^*$       | $b(1977)$     | $\tau(1975)$  | $\nu_\tau(2000)^*$ | $\leftarrow 3$ |
|           | $H = (pe)$        |               | $p = (uud)$   | $n = (udd)$        |                |
| $J = 1$   | $G_\mu^a(1978)^*$ | $A_\mu(1905)$ | $W_\mu(1984)$ | $Z_\mu(1984)$      |                |

Fig. 1 Full particle content of the SM with the dates of the experimental discoveries. Exceptions to this rule are the photon and the  $u, d, s$  quarks, both conceptually introduced after their experimental manifestation.  $J = 0, 1/2, 1$  indicates the corresponding spin. The "flavour index"  $i = 1, 2, 3$  denotes the three different families of matter particles. The stars signal the particles whose experimental discovery has not given rise to a Nobel prize.

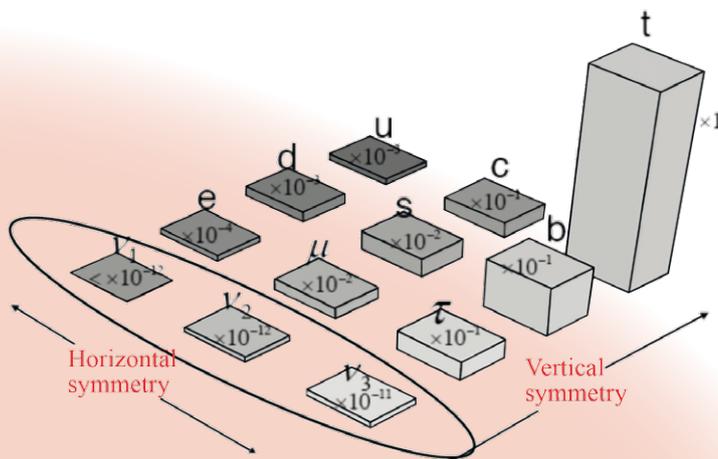


Fig. 2 A graphical representation of the masses of the quarks and leptons. To allow a realistic representation, the masses are rescaled by the factors indicated. In the strict SM Lagrangian the neutrinos are massless, which motivates the ellipse around them.

- The interaction with the W-boson is the only one that produces transitions between particles of different generations, the quarks of charge  $2/3$ ,  $u_i$ , and  $-1/3$ ,  $d_j$ , with an amplitude proportional to the elements  $V_{ij}$  of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) unitary matrix [3, 4].
- The masses of all the charged fermions, *i.e.* every fermion except the neutrinos, are linearly related to their respective couplings to the Higgs boson.

There is mounting direct evidence, again extended and precise, for the first two of these features [5]. Even the third one is receiving support from measurements performed at LHC, although limited, for the time being, to the heaviest particles and to 20–30% precision. The problem comes with the numerical values both of the masses and of the "mixing angles"  $V_{ij}$ ; they are all pure parameters. The values of the masses are graphically represented in fig. 2. The main feature of the CKM matrix is the smallness of the entries connecting the third heaviest generation to the two lighter ones at or below  $5 \cdot 10^{-2}$  level. The inability of the theory to predict any of these fundamental quantities is in sharp contrast with the fact that almost all of them are measured with significant precision<sup>1</sup>, up to  $10^{-7}$  in the case of the electron mass. This contrast, in fact, may introduce skepticism on the possibility of throwing light on this "flavour puzzle" without experimental inputs of a new kind that would show deviations from the flavour pattern of the SM.

## 2 A $U(2)^5$ flavour symmetry

Most if not all the attempts to try to attack this problem are based on symmetries, which I do not try to describe here<sup>2</sup>. Rather I focus on one such symmetry that does not determine

<sup>1</sup> Since the quarks do not exist free, their mass requires a suitable definition. This is not a significant limitation, except for the lightest quarks,  $u$  and  $d$ , whose masses are only known with a precision of about 20–30 %.

<sup>2</sup> For a recent review, see [6].

*per se* any of the flavour parameters but is suggested by their generic pattern and, more importantly, can hide deviations from the SM that are there, waiting to be discovered.

At the origin of the phenomenological features of flavour physics outlined above there is the group of unitary transformations,  $G = U(3)^5$ , that leave unchanged the SM Lagrangian in the limit in which the Yukawa couplings between the Higgs boson and the fermions are formally switched off. This symmetry arises because, as we said, the three fermions of given gauge quantum numbers, altogether making five different irreducible representations of the SM gauge group, are precisely only distinguished by the Yukawa couplings themselves. To account for the Yukawa couplings, *i.e.* for the masses and the mixing angles, is equivalent to control the precise breaking of this symmetry.

While we do not know what gives rise to this breaking, a significant feature emerges from the data. In the limit in which one neglects the masses of the first two generations and their mixings with the third one, both numerically small, a  $U(2)^5$  subgroup of the full  $G = U(3)^5$  remains unbroken, which acts on the lighter two generations as doublets and on the third generation fermions as singlets<sup>3</sup>:  $U(2)^5$  is an approximate symmetry of the observed flavour parameters. Once again to test quantitatively the relevance of  $U(2)^5$  would require knowing the origin of its small breaking. A different indirect possibility emerges, however, if there are other interactions than the SM ones with suitable  $U(2)^5$  properties. Assuming that this be the case, the deviations they would produce in flavour physics relative to the SM could have been kept below observability so far by the small amount of  $U(2)^5$  breaking, but nevertheless be there and possibly discovered by further more precise observations. New observables could also give more insight into the flavour puzzle itself [7, 8].

### 3 Putative anomalies in B-decays and lepton flavour universality

The hypothesis put forward in the last paragraph of the previous section is a daring one. It motivates, however, to give consideration to a number of experimental results that have progressively emerged in the last five years and seem to indicate altogether an anomaly in B-meson decays. The quantities of main interest are the two ratios

$$(1) \quad R_D^{(*)} \equiv \frac{BR(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{BR(B \rightarrow D^{(*)} l \nu)}, \quad l = e, \mu,$$

$$(2) \quad R_K^{(*)} \equiv \frac{BR(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{BR(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)},$$

between branching ratios of B-decays only differing in the lepton appearing in the final states:  $\tau$  versus  $e$  or  $\mu$  in the first case;  $\mu$  versus  $e$  in the second case. One focuses on these ratios because the uncertainties due to the treatment of  $B$ ,  $D$  or  $K$  quark-antiquark bound states drop out when predicting them in the SM. The experimental results relevant to the two cases are shown in tables 1 and 2, respectively and compared with the SM expectations. As one can see, while no single experimental result is precise enough to allow the claim of a discovered anomaly –a reason to be cautious– their global consideration is suggestive. If confirmed, they would bring evidence against Lepton Flavour Universality (LFU), expected in the SM and always respected in experiments so far.

In fact, if one wants to consider the anomalies in  $R_D^{(*)}$  and  $R_K^{(*)}$  together, it is important to note the different nature of the two decays at quark level: the “charged current” process  $b \rightarrow c \tau \nu$

<sup>3</sup> The smallness of the third-generation  $b$ -quark and  $\tau$ -lepton masses relative to the top-quark one may signal the relevance of a larger approximate symmetry  $U(2)^5 \times U(1)_{b_R} \times U(1)_{\tau_R}$ . This variation does not influence any of the following considerations.

| exp                    | $R_D$                       | $R_{D^*}$                   |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| BaBar [9]              | $0.440 \pm 0.058 \pm 0.042$ | $0.332 \pm 0.024 \pm 0.018$ |
| Belle(2015) [10]       | $0.375 \pm 0.064 \pm 0.026$ | $0.293 \pm 0.038 \pm 0.015$ |
| Belle(2016) [11]       | –                           | $0.302 \pm 0.030 \pm 0.011$ |
| Belle(2016, full) [12] | –                           | $0.270 \pm 0.035 \pm 0.011$ |
| LHCb(2015) [13]        | –                           | $0.336 \pm 0.027 \pm 0.030$ |
| LHCb(2017) [14]        | –                           | $0.286 \pm 0.019 \pm 0.033$ |
| Average [5]            | $0.407 \pm 0.039 \pm 0.024$ | $0.304 \pm 0.013 \pm 0.007$ |
| SM prediction          | $0.299 \pm 0.003$ [15]      | $0.257 \pm 0.005$ [16]      |

Table 1 Data on  $R_D$  and  $R_{D^*}$  compared with the SM prediction.

|                    | $R_K$                               | $R_{K^*}^{\text{low}}$          | $R_{K^*}^{\text{high}}$         |
|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| LHCb [17, 18]      | $0.745^{+0.090}_{-0.074} \pm 0.036$ | $0.66^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.03$ | $0.69^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.05$ |
| SM prediction [19] | $1.00 \pm 0.01$                     | $0.91 \pm 0.03$                 | $1.00 \pm 0.01$                 |

Table 2 Data on  $R_K$  and  $R_{K^*}$  compared with the SM prediction. The  $q^2$  range of the lepton pair in the measurements of  $R_K$  and  $R_{K^*}^{\text{high}}$  is from 1 to 6  $\text{GeV}^2$ , and from 0.045 to 1.1  $\text{GeV}^2$  in  $R_{K^*}^{\text{low}}$ .

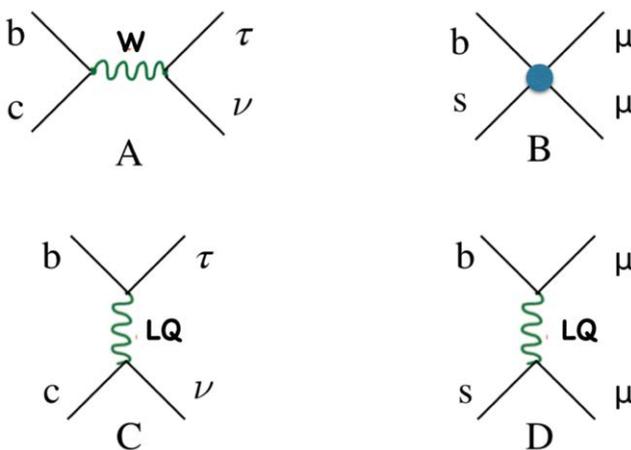


Fig. 3 A) The W-exchange amplitude for  $b \rightarrow c\tau\nu$  in the SM; B) the collection of loop diagrams, represented by a blob, in the SM amplitude for  $b \rightarrow s\mu\mu$ ; C) the lepto-quark exchange amplitude for  $b \rightarrow c\tau\nu$ ; D) the lepto-quark exchange amplitude for  $b \rightarrow s\mu\mu$ .

in the case of the  $B$  to  $D$  transition (table 1), versus the “neutral current” process  $b \rightarrow s\mu\mu$  in the  $B$  to  $K$  case (table 2). This introduces an important difference between the two processes: while the flavour transition in the first case is due to a tree level exchange of the W-boson (fig. 3A), the flavour change in the neutral current process can only occur at second order in the electroweak interactions (fig. 3B). In turn this manifests itself in the values of the two branching fractions:  $B \rightarrow D\tau\nu$  is more than four orders of magnitude larger than  $B \rightarrow K\mu\mu$ . In passing we recall that other measurements involving the  $b \rightarrow s$  transition indicate possible deviations from the SM of size consistent with the anomalies shown in table 2. Not involving deviations from LFU, however, their prediction in the SM is at the moment more subject to theoretical uncertainties. See ref. [20] for a recent summary of experiments and theoretical analyses.

If confirmed by future measurements, are there qualitative reasons to think that these anomalies might be related to  $U(2)^5$ ? On general grounds  $U(2)^5$  introduces a natural distinction between semi-leptonic  $K$  and  $\pi$  decays on one side, where successful tests of LFU are ubiquitous, and  $B$  semi-leptonic decays on the other side, where LFU violations seem to emerge. More specifically, suppose that the deviations from the SM in both the charged and neutral current modes be due to the exchange of a massive bosonic mediator around the TeV scale. If this mediator is coupled only to third-generation fermions in the limit of unbroken  $U(2)^5$ , this can explain the comparable relative deviations from the tree-level versus loop-level SM amplitudes, which are apparently being observed:  $b \rightarrow c\tau\nu$  only involves a single second-generation particle, i.e. a single  $U(2)^5$ -breaking, whereas  $b \rightarrow s\mu\mu$  has three second-generation fermions in it or three  $U(2)^5$ -breaking suppressions [21].

#### 4 A lepto-quark mediator of the anomalies

To a good approximation the four-fermion effective operators that give rise to  $b \rightarrow c\tau\nu$  and  $b \rightarrow s\mu\mu$  in the SM are all made of left-handed fields. This is because only the W-exchange may give flavour transitions and because of the left-handed nature of the weak interactions. Respecting Lorentz and SM gauge invariance, a number of mediators can give rise, through their exchange, to effective

amplitudes capable to interfere with these operators without having to pay for small mass suppressions: colourless vectors or colour-triplet scalars or vectors [22–26]. There is however a single mediator that has this property and is not conflicting with the non-observation, so far, of  $B \rightarrow K^{(*)} \nu \nu$ : the vector  $U_\mu^a$  transforming under the  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  SM gauge group as  $(3, 1, 2/3)$ , i.e. a charge  $2/3$  lepto-quark [21]. The relevant gauge invariant interaction is

$$(3) \quad \mathcal{L}_U = g_U (\bar{q}_L^a \gamma^\mu l_L) U_\mu^a,$$

where  $q$  and  $l$  are left-handed  $SU(2)$ -doublets with implicit indices contracted and  $a$  is a colour index. The flavour indices in  $q$  and  $l$  are not specified. However, with unbroken  $U(2)^5$ , the allowed coupling would only be the one to the third generation, as anticipated and desired, since the first two generations of  $q$  and  $l$  transform as doublets under *different*  $U(2)$  factors of the full flavour group. After  $U(2)^5$  breaking, the relevant amplitudes are shown in fig. 3C and 3D. They can account for the observed anomalies with a ratio between the coupling and the mass of the vector lepto-quark of about  $g_U/m_U \approx 2/\text{TeV}$  and with  $U(2)^5$ -breaking parameters of similar size to the ones occurring in the spectrum and mixings of the SM fermions at about  $5 \cdot 10^{-2}$  level. Note that, at the elementary level,  $B \rightarrow K^{(*)} \nu \nu$  is  $b \rightarrow s \nu \nu$ , which is not produced by  $U$ -exchanges.

## 5 A Pati-Salam $SU(4)$ model

Can one make sense of a massive vector lepto-quark at more than an effective field theory level? To this end the observation [21] comes obviously to mind that the quantum numbers of the lepto-quark under the SM gauge group are the same as for the lepto-quark living inside the adjoint representation of the Pati-Salam  $SU(4)$  group. This group, first proposed in 1974, unifies colour with the  $(B-L)$  charge by treating lepton number as a fourth colour [27]. As a consequence, the vectors (generators) of  $SU(4)$  are grouped in representations of  $SU(3) \times U(1)_{B-L}$  as

$$(4) \quad \mathcal{G}_\mu \rightarrow G_\mu(8, 0) \oplus U_\mu(3, 2/3) \oplus U_\mu^+(\bar{3}, -2/3) \oplus B_\mu(1, 0),$$

graphically represented in fig. 4.

The inclusion of fermions in this picture faces, however, an immediate difficulty. Since the quarks and the leptons of a given helicity are normally unified in 4-plets of  $SU(4)$ , the ones of the first two generations cannot transform anymore as doublets of two different  $U(2)$  factors of the flavour group, as advocated above. Consequently, the unsuppressed exchange of the lepto-quark between the first two families, with  $g_U/m_U \approx 1.5/\text{TeV}$  as for the third one, would generate a  $K_L \rightarrow \mu e$

transition at a rate exceeding the experimental bound by several orders of magnitude. This difficulty can be avoided by enlarging the  $SU(4)$  group and/or by introducing extra heavy vector-like fermions to which the SM fermions are suitably mixed. Different implementations of this features [28–36] lead to a number of observable consequences, both in flavour physics and in collider physics. Here we observe that the constraint  $g_U/m_U \approx 1.5/\text{TeV}$  and the lower limits on the mass  $m_U$  by direct collider searches, at about 1.5 TeV, require a relatively large coupling  $g_U$  of the lepto-quark,  $g_U \gtrsim 2.5$ , to the third generation of fermions. In turn this suggests to hypothesize a composite picture of the lepto-quark, as resulting from a new strong interaction possessing an  $SU(4)$  global symmetry and capable to produce at the same time a composite pseudo-Goldstone Higgs boson [21, 28, 34].

## 6 Summary

The inability to predict the masses of any of its particles, with the exception of the massless gluon and photon, is a drawback of the SM. This problem is particularly acute in the fermion sector, with the greatest number of particles and the equal limitation to predict the mixing angles. I have referred to this altogether as the flavour puzzle.

Given the current precise experimental knowledge of most of the flavour parameters, one is inclined to think that progress on this issue might only come from new measurements showing deviations from the SM in the flavour sector itself. One can legitimately ask, however, how likely is this to happen in view of the increasing confirmations that the SM keeps receiving, lastly especially at LHC. It has been argued that the observed approximate  $U(2)^5$  flavour symmetry may have played a role in this, acting to keep hidden so far possible deviations from the SM even in the

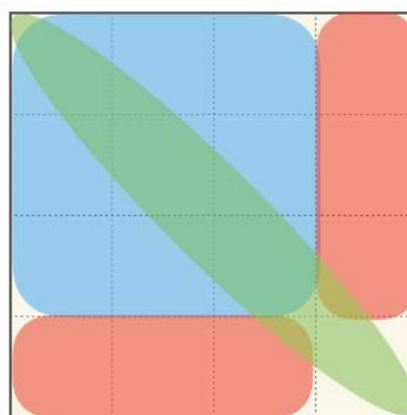


Fig. 4 A graphical representation of the  $SU(4)$  vectors: blue = gluons; red = lepto-quarks; green =  $(B-L)$  vector.

presence of new interactions at the TeV scale. In turn, since  $U(2)^5$  introduces a symmetry distinction between the third and the first two generations of quarks and leptons, the putative anomalies emerging in B-meson decays represent an obvious phenomenon to watch.

The reality of these anomalies needs confirmation. Luckily the experimental opportunities are there both to improve the precision in the key observables and to extend the searches in related directions. These related directions, in other flavour observables and in direct searches of possible mediators as well, only partially depend on the modelling of the anomalies themselves. This is particularly the case for the models briefly outlined in sects. 4 and 5. The eventual confirmation of the

anomalies will tell if any of these models is relevant or it will indicate the different direction to explain them. All this is without forgetting the pending resolution of the flavour puzzle.

## Acknowledgments

I am deeply indebted to their collaboration/discussions on these matters to Dario Buttazzo, Roberto Contino, Gino Isidori, Paolo Lodone, Christopher Murphy, Andrea Pattori, Maurizio Pierini, Filippo Sala, Fabrizio Senia, David Straub, Andrea Tesi, Riccardo Torre.

## Bibliography

- [1] G. Aad *et al.* (ATLAS Collaboration), *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 1, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020 [arXiv:1207.7214 [hep-ex]].
- [2] S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collaboration), *Phys. Lett. B*, 716 (2012) 30, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021 [arXiv:1207.7235 [hep-ex]].
- [3] N. Cabibbo, *Phys. Rev. Lett.*, 10 (1963) 531, doi:10.1103/PhysRevLett.10.531.
- [4] M. Kobayashi, T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.*, 49 (1973) 652, doi:10.1143/PTP.49.652.
- [5] Y. Amhis *et al.*, arXiv:1612.07233 [hep-ex] and update at <http://www.slac.stanford.edu/xorg/hflav/semi/fpcp17/RDRDs.html>
- [6] F. Feruglio, *Eur. Phys. J. C*, 75 (2015) 373, doi:10.1140/epjc/s10052-015-3576-5 [arXiv:1503.04071 [hep-ph]].
- [7] R. Barbieri, G. Isidori, J. Jones-Perez, P. Lodone, D. M. Straub, *Eur. Phys. J. C*, 71 (2011) 1725 [arXiv:1105.2296 [hep-ph]].
- [8] R. Barbieri, D. Buttazzo, F. Sala, D. M. Straub, *JHEP*, 1207 (2012) 181 [arXiv:1203.4218 [hep-ph]].
- [9] J. P. Lees *et al.* (BaBar Collaboration), *Phys. Rev. D*, 88 (2013) 072012, doi:10.1103/PhysRevD.88.072012 [arXiv:1303.0571 [hep-ex]].
- [10] M. Huschle *et al.* (Belle Collaboration), *Phys. Rev. D*, 92 (2015) 072014, doi:10.1103/PhysRevD.92.072014 [arXiv:1507.03233 [hep-ex]].
- [11] A. Abdesselam *et al.* (Belle Collaboration), arXiv:1603.06711 [hep-ex].
- [12] S. Hirose *et al.* (Belle Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, 118 (2017) 211801, doi:10.1103/PhysRevLett.118.211801 [arXiv:1612.00529 [hep-ex]].
- [13] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, 115 (2015) 111803, Erratum: *Phys. Rev. Lett.*, 115 (2015) 159901, doi:10.1103/PhysRevLett.115.159901, 10.1103/PhysRevLett.115.111803 [arXiv:1506.08614 [hep-ex]].
- [14] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), arXiv:1711.02505 [hep-ex].
- [15] D. Bigi, P. Gambino, *Phys. Rev. D*, 94 (2016) 094008, doi:10.1103/PhysRevD.94.094008 [arXiv:1606.08030 [hep-ph]].
- [16] S. Jaiswal, S. Nandi, S. K. Patra, *JHEP*, 1712 (2017) 060, doi 10.1007/JHEP12(2017)060 [arXiv:1707.09977 [hep-ph]].
- [17] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 151601, doi:10.1103/PhysRevLett.113.151601 [arXiv:1406.6482 [hep-ex]].
- [18] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), *JHEP*, 1708 (2017) 055, doi:10.1007/JHEP08(2017)055 [arXiv:1705.05802 [hep-ex]].
- [19] M. Bordone, G. Isidori, A. Pattori, *Eur. Phys. J. C*, 76 (2016) 440, doi:10.1140/epjc/s10052-016-4274-7 [arXiv:1605.07633 [hep-ph]].
- [20] M. Ciuchini, A. M. Coutinho, M. Fedele, E. Franco, A. Paul, L. Silvestrini, M. Valli, *Eur. Phys. J. C*, 77 (2017) 688, doi:10.1140/epjc/s10052-017-5270-2 [arXiv:1704.05447 [hep-ph]].
- [21] R. Barbieri, G. Isidori, A. Pattori, F. Senia, *Eur. Phys. J. C*, 76 (2016) 67 [arXiv:1512.01560 [hep-ph]].
- [22] A. Greljo, G. Isidori, D. Marzocca, *JHEP*, 1507 (2015) 142 [arXiv:1506.01705].
- [23] L. Calibbi, A. Crivellin, T. Ota, *Phys. Rev. Lett.*, 115 (2015) 181801 [arXiv:1506.02661].
- [24] M. Bauer, M. Neubert, arXiv:1511.01900.
- [25] S. Fajfer, N. Kosnik, arXiv:1511.06024.
- [26] D. Buttazzo, A. Greljo, G. Isidori, D. Marzocca, *JHEP*, 1711 (2017) 044 [arXiv:1706.07808 [hep-ph]].
- [27] J. C. Pati, A. Salam, *Phys. Rev. D*, 10 (1974) 275; Erratum: *Phys. Rev. D*, 11 (1975) 703.
- [28] R. Barbieri, C. W. Murphy, F. Senia, *Eur. Phys. J. C*, 77 (2017) 8, doi:10.1140/epjc/s10052-016-4578-7 [arXiv:1611.04930 [hep-ph]].
- [29] B. Diaz, M. Schmaltz, Y. M. Zhong, *JHEP*, 1710 (2017) 097 [arXiv:1706.05033 [hep-ph]].
- [30] L. Di Luzio, A. Greljo, M. Nardecchia, arXiv:1708.08450 [hep-ph].
- [31] N. Assad, B. Fornal, B. Grinstein, arXiv:1708.06350 [hep-ph].
- [32] L. Calibbi, A. Crivellin, T. Li, arXiv:1709.00692 [hep-ph].
- [33] M. Bordone, C. Cornella, J. Fuentes-Martin, G. Isidori, arXiv:1712.01368 [hep-ph].
- [34] R. Barbieri, A. Tesi, arXiv:1712.06844 [hep-ph].
- [35] M. Blanke, A. Crivellin, arXiv:1801.07256 [hep-ph].
- [36] A. Greljo, B. A. Stefanek, arXiv:1802.04274 [hep-ph].

Riccardo Barbieri

Riccardo Barbieri è Professore Emerito di Fisica Teorica presso la Scuola Normale Superiore di Pisa. Ha scritto più di duecento articoli di ricerca nel campo della fisica teorica delle particelle elementari ed è stato particolarmente influente nella fisica oltre il Modello Standard.

# LIQUID PHASE AND THERMODYNAMICS OF WATER

FRANCESCO MALLAMACE<sup>1,2</sup>, CARMELO CORSARO<sup>2</sup>, ENZA FAZIO<sup>2</sup>,  
SVEVA LONGO<sup>2</sup>, DOMENICO MALLAMACE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department NSE, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, USA

<sup>2</sup> Dipartimento MIFT, Università di Messina, Messina, Italia

Water is certainly the most studied physical system because of its importance in many different disciplines. In spite of the ever growing number of performed experiments and of proposed theoretical models, we still do not have a unitary vision nor an exhaustive explanation of its properties and of the various anomalies that characterize water especially in its liquid phase. In this work we will mainly consider the density variable, the first to be experimentally studied, as a function of temperature and pressure. We will then derive some functions related to volume and entropy fluctuations whose behaviour will allow us to illustrate some features in the thermodynamics of its liquid phase.

## L'ACQUA NELLA SUA FASE LIQUIDA E LA SUA TERMODINAMICA

### 1 Introduzione

Sebbene l'acqua sia fondamentale per la vita, quanto per le scienze e le tecnologie, si è lontani da una sua comprensione esaustiva. La necessità di capirla ha intrigato dal passato ad oggi molti filosofi e ricercatori. Per Omero (Iliade XIV vv 201 e 244), Talete di Mileto e Aristotele (Metafisica I, 3, 983 b 6 sgg.) l'acqua è il "principio" di tutte le cose, per Empedocle è una delle quattro radici dell'universo insieme a fuoco, aria e terra, e ancora per Aristotele e Teofrasto essa è *ciò che dà vita e tiene in vita le cose*. Da allora bisogna arrivare a Galileo Galilei per una prima ipotesi sulla sua anomalia termodinamica: il suo solido (ghiaccio) galleggia sul liquido mentre in genere per tutte le altre sostanze esso vi annega. Per il grande pisano il ghiaccio era semplicemente meno denso del liquido [1]; la conferma di questo venne data a venticinque anni dalla sua morte, 1667, quando a Firenze furono pubblicati i saggi dell'Accademia del Cimento, che riportando una sintesi dei lavori sperimentali compiuti lungo l'arco di un decennio dimostrano nel capitolo "Esperienze per conoscer se l'acqua si dilata nell'agghiacciare" la peculiarità dell'acqua di avere un massimo nella densità [2]. Questo sembra confermare il ruolo di Galilei nella prima importante scoperta sull'acqua e certifica un primato della fisica italiana agli albori del metodo scientifico.

Nei 350 anni successivi sono state osservate nell'acqua più di sessanta anomalie termodinamiche. A queste anomalie vengono associati molti comportamenti e proprietà, soprattutto nelle soluzioni, ai confini tra differenti aree scientifiche quali: fisica, chimica e biologia. Elemento unificante di queste diversità, quasi la chiave per spiegarle, è il legame idrogeno (HB) e per chiarirle sono stati compiuti molti studi sperimentali e teorici [3–5].

Teorie che, articolandosi su basi collettive, hanno permesso di capire molta della fisica non solo dell'acqua ma anche dei sistemi complessi di cui essa è un costituente attivo: soluzioni, macromolecole, polimeri e colloidi, sistemi critici fuori dall'equilibrio termodinamico, ecc. [6, 7]. Tali teorie, evoluzione dei modelli di Paul Flory [8] sui polimeri, permettono di comprendere le proprietà dei materiali biologici quali peptidi, proteine, enzimi, DNA e RNA, cellule ed in generale i sistemi della moderna biologia molecolare. Essendo questi dei polielettroliti interagiscono in maniera idrofila tramite l'HB o idrofoba; interazioni che avvengono con l'acqua, tra di loro o al loro interno (e.g. il *folding* delle proteine è dovuto a interazioni intra-molecolari). Come dimostrato da Pierre-Gilles de Gennes, tali sistemi sono governati dagli algoritmi comuni di scaling e di universalità [9] tipici delle transizioni di fase e dei fenomeni critici.

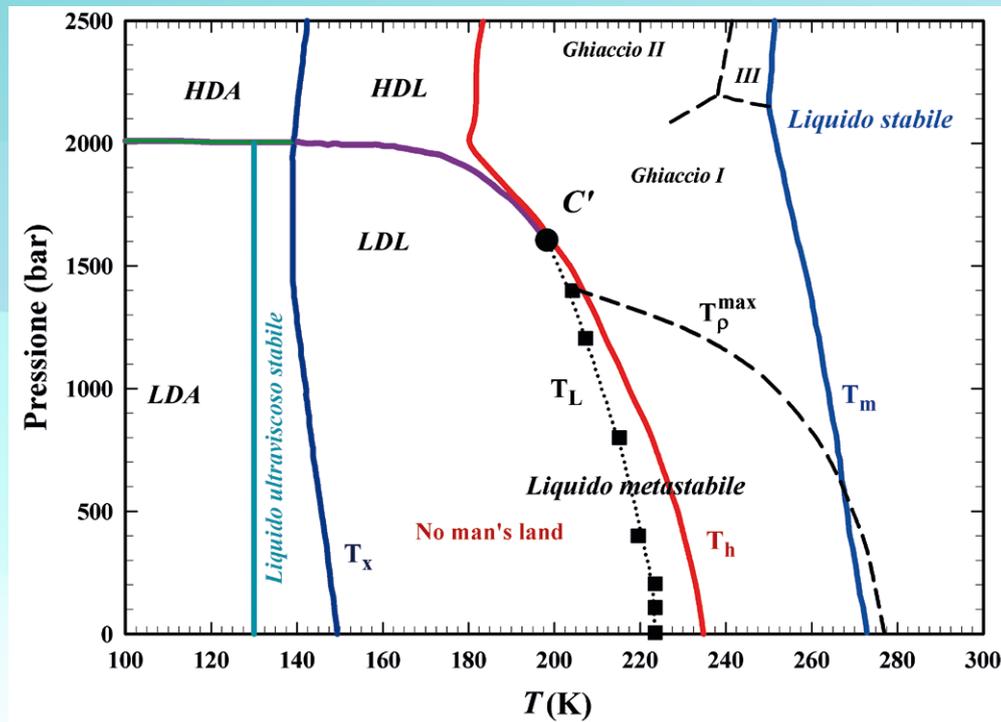


Fig. 1 Il diagramma di fase dell'acqua nel piano  $P$ - $T$ , negli intervalli  $1 < P < 2500$  bar e  $100 < T < 300$  K. Sono mostrate le zone di stabilità e di metastabilità della fase liquida ( $T_x < T < T_m$ ), le due fasi amorphe (HDA e LDA) nonché la linea di Widom ( $T_L$ ) culminante nell'ipotizzato secondo punto critico  $C'$ .

Il sistema acqua possiede tali peculiarità, per gli effetti dell'HB è classificabile in termini di oligomeri "transienti" nel senso che nel tempo si rompono e si riformano diventando sempre più stabili al ridursi della temperatura. Queste osservazioni mostrano, in sintonia con le intuizioni dei filosofi greci, che l'acqua e la biologia possono essere legate in un unico ordinamento concettuale capace di provvedere ad una descrizione coerente e precisa dei fenomeni della vita.

Su questo si articolano le attuali ricerche sull'acqua (e le sue soluzioni) con una larga molteplicità di problemi tuttora aperti. Per l'acqua pura i più importanti sono, insieme alle anomalie nelle sue funzioni di risposta termodinamiche, il suo polimorfismo e quanto accade nella sua fase metastabile sottoraffreddata cioè: la definizione delle fasi di esistenza del liquido ed il suo stesso diagramma di fase, la possibile esistenza di un secondo punto critico di tipo liquido-liquido [3-5]. Nelle soluzioni il problema fondamentale da chiarire è l'effetto idrofobico che determina i mutui effetti della interazione idrofilica-idrofobica fra soluto e solvente, e come è fatta localmente l'interazione idrofobica. Conosciamo in maniera ragionevolmente accurata il potenziale di interazione idrofilico (HB) ma molto va ancora approfondito su quello idrofobico. In questo contesto il numero di studi eseguiti tramite simulazioni numeriche è elevato rispetto a quelli di natura sperimentale. Questo problema, di assoluto

rilievo in biologia molecolare quanto in genetica, se chiarito, aprirebbe una nuova strada per una più piena comprensione delle problematiche in cui l'acqua è fondamentale [6, 7].

Le anomalie dell'acqua si manifestano quasi tutte sotto la temperatura di fusione [10],  $T_m = 273,16$  K ( $0^\circ\text{C}$ ), e quindi nella fase metastabile sottoraffreddata ( $T < T_m$ ) e oltre, dove in condizioni di stabilità esisterebbe solo il ghiaccio. Il liquido può essere agevolmente sottoraffreddato (in natura costituisce le nuvole) in linea di principio fino alla temperatura di nucleazione omogenea,  $T_h = 231$  K [3].

Se l'acqua, dalle condizioni ambientali, è portata velocemente a poche decine di gradi K si può evitare la formazione del cristallo ottenendo un solido con un disordine molecolare analogo a quello di un liquido: cioè un amorfo [11, 12]. Se esso viene riscaldato lentamente diviene di nuovo liquido a circa 130 K, tale liquido ultraviscoso si mantiene fino a  $T_x = 150$  K, dopo di che ridiventa ghiaccio cristallino. Quindi a pressione ambiente l'acqua è in forma liquida sia ad alta,  $T > T_h$ , che a bassa temperatura,  $T < T_x$ , mentre per  $231 > T > 150$  K (la *no man's land*) ciò è impossibile. Questo a meno che non si trovi una maniera di eliminare i centri di nucleazione. Cosa possibile se si confina l'acqua in nanopori di poco più piccoli di questi centri o la si deposita in film sottili su macromolecole (e.g. proteine). Nanopori con fori di 2 nm, o tre layer molecolari di idratazione sulla macromolecola sono

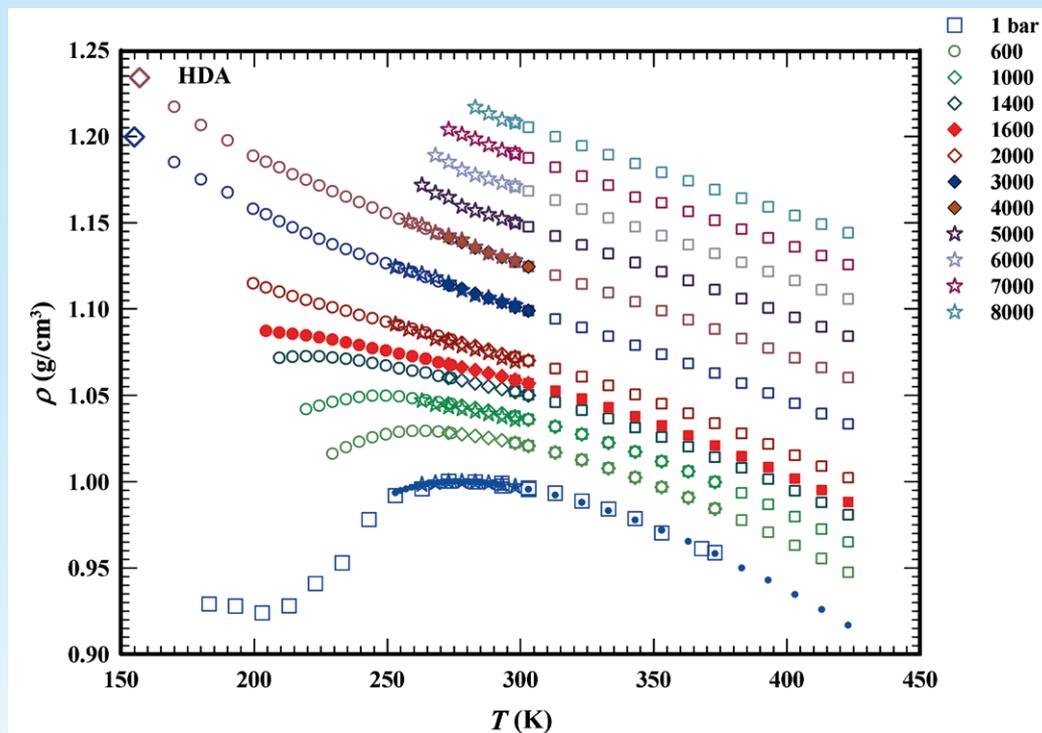


Fig. 2 La densità in funzione della temperatura a differenti pressioni da 1 a 8000 bar [14–18]. Tranne che per i dati a 1 bar e riportati come quadrati e misurati in acqua confinata, tutti gli altri sono stati misurati in acqua di volume. Si può vedere come aumentando la temperatura il massimo tende a scomparire nella regione  $1600 < P < 2000$  bar. Nella stessa regione si nota il cambio di curvatura nella  $\rho_p(T)$ .

sufficienti per mantenere l'acqua liquida fino a circa 150 K.

Attualmente l'idea che l'acqua confinata abbia le stesse proprietà di quella di *bulk* (volumi al di sopra delle mesofasi) è un problema aperto. Qui comunque, pur consapevoli che essa è l'elemento di base nella biologia ed il ponte con cui le metodologie fisiche si applicano a questa disciplina, useremo poco i dati di acqua confinata. Vogliamo invece mostrare che se guardiamo al diagramma di fase della sola acqua di bulk ed usiamo semplici funzioni termodinamiche possiamo comprendere quasi tutta la chimico-fisica di questo liquido affascinante. Partendo dalla variabile densità misurata in funzione delle altre due, pressione e temperatura,  $\rho(P, T)$ , esploreremo la sua termodinamica.

Dipendendo da pressione e temperatura ( $P$  e  $T$ ) sono possibili due forme amorphe caratterizzate da densità differenti [11, 12]; quindi, come il ghiaccio, anche l'amorfo è polimorfo. Su queste basi è stato ipotizzato il polimorfismo del liquido fatto da due forme coesistenti con differenti densità: l'alta (*high-density liquid* HDL) e la bassa (*low-density liquid* LDL). Quest'ultima è dovuta alla capacità dell'HB di formare *clusters* di molecole d'acqua a struttura tetraedrica e costituisce quel "polimero transiente" di cui abbiamo parlato; l'HDL è costituita dal resto: monomeri, dimeri e trimeri. Riducendo la temperatura l'LDL cresce a discapito dell'HDL divenendo sempre più stabile. La *fig. 1*, illustrando

il diagramma di fase dell'acqua, mostra parte del suo polimorfismo.

Lo scopo di questo lavoro è mostrare che partendo dalla densità del liquido acqua è possibile ricostruire gli elementi più rilevanti della fisica del sistema. Cominceremo dai dati misurati più di un secolo fa da Percy W. Bridgman e riportati nel lavoro "*Water, in the liquid and five solid forms, under pressure*" [13]. Ad essere precisi i dati qui riportati (volume specifico  $1/\rho$ ) sono nella tabella XXXI di questo lavoro ( $-20 < T < 25$  °C e  $1 < P < 10^4$  bar). Noi abbiamo già tratto profitto dal suggerimento esplicito riportato nella *fig. 39* di questo articolo: l'acqua liquida così come ha un massimo ad una data temperatura deve avere un minimo se sottoraffreddata. Seguendo questo suggerimento, ed utilizzando acqua confinata, abbiamo trovato tale minimo a circa 200K [14].

## 2 La densità

La *fig. 2* mostra i dati di Bridgman (stelle) e la scomparsa del massimo, al di sopra di 1500 bar. La figura mostra inoltre tutti i dati di acqua di volume misurati successivamente [15–18], in alcuni casi in capillari (millimetro o sue frazioni) o in emulsione (6–10 micron). Con le emulsioni è stato possibile esplorare le temperature più basse fino a 4 kbar [15–18]; la

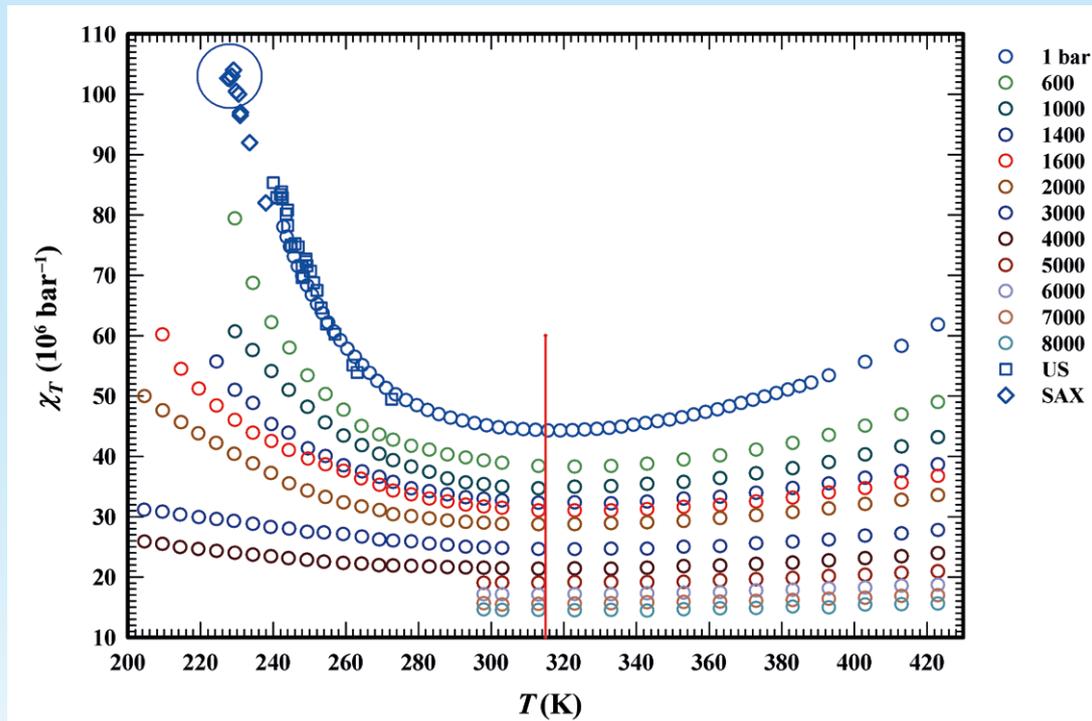


Fig. 3 La compressibilità isoterma  $\chi_T(T, P)$  per le differenti pressioni nell'intervallo  $1 < P < 8000$  bar [19]. Si può osservare come il suo minimo sia localizzato, per tutte le pressioni studiate, alla stessa temperatura  $T^* = 315 \pm 5$  K (linea rossa) [19]. Inoltre, la  $\chi_T$  diminuisce nei valori e nella curvatura al crescere della pressione. Il cerchio, ai valori più alti, mostra la presenza di un suo massimo individuato di recente in un esperimento di *small-angle X-ray scattering* (SAXS) [20].

prima osservazione è che all'aumentare di  $P$  corrisponde una crescita della regione di stabilità del liquido verso bassissime temperature (la  $T_h(P)$  diminuisce in corrispondenza). La seconda osservazione, più importante, riguarda la scomparsa del massimo all'aumentare della pressione:  $T_m(P)$  evolve verso le temperature più basse e scompare nell'intervallo 1,6–2 kbar. Anzi le curve  $\rho(T)$  intorno a queste pressioni mostrano un definitivo cambiamento di curvatura, da concave diventano convesse.

Cosa effettivamente succede lo possiamo capire se guardiamo alle funzioni termodinamiche "legate" alla densità: la compressibilità isoterma  $\chi_T(T, P)$  e la espansività  $\alpha_p(T, P)$ :

$$(1) \quad \chi_T = (\partial \ln \rho / \partial \ln P)_T = -V^{-1} (\partial V / \partial P)_T, \quad \chi_T = \langle \delta V^2 \rangle_{PT} / k_B T V,$$

$$\alpha_p = -(\partial \ln \rho / \partial T)_p = -V^{-1} (\partial S / \partial P)_T, \quad \alpha_p = \langle \delta S \delta V \rangle_{PT} / k_B T V.$$

A destra sono evidenziate le fluttuazioni da cui le due funzioni dipendono,  $\chi_T$  da quelle di volume  $\delta V^2$ , mentre  $\alpha_p$  è la correlazione incrociata delle fluttuazioni di entropia  $\delta S$  e di volume  $\delta V$ . Ovviamente vale anche

$$(2) \quad (\partial \alpha_p / \partial P)_T = -(\partial \chi_T / \partial T)_p.$$

### 3 Compressibilità ed espansività

Le prossime due figure rappresentando queste due funzioni, indicano alcune importanti singolarità; la fig. 3 mostra  $\chi_T$  e la fig. 4  $\alpha_p$  calcolate in accordo alle loro definizioni (eq. (1)). Per la  $\chi_T(T, P)$  si osserva un suo minimo localizzato, per tutte le pressioni studiate, alla stessa temperatura  $T^* = 315 \pm 5$  K (linea rossa) [19]. Inoltre, essa diminuisce nei valori e nella curvatura al crescere di  $P$ . Il cerchio sulla destra, ai valori più alti, evidenzia, la presenza di un massimo individuato recentemente con lo *small angle X-ray scattering* (SAXS) [20].

È invece sorprendente e ricco di informazioni il comportamento della  $\alpha_p(T, P)$  (fig. 4). Anche nella espansività  $T^*$  si propone come una temperatura di grande interesse. Infatti si osserva che tutte le curve rappresentanti  $\alpha_p(T)$  alle diverse pressioni si incrociano nello stesso punto localizzato proprio a  $T^*$ , dove  $\alpha_p = 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Tale temperatura taglia il piano  $\alpha_p - T$  in due regioni di comportamenti differenti, soprattutto se si considera che la espansività identifica la *cross correlation* di entropia e di volume  $\langle \delta S \delta V \rangle$ . Per  $T > T^*$ ,  $\alpha_p$  è monotona per tutte le pressioni studiate; crescendo  $T$  essa, alle basse pressioni, incrementa leggermente i propri

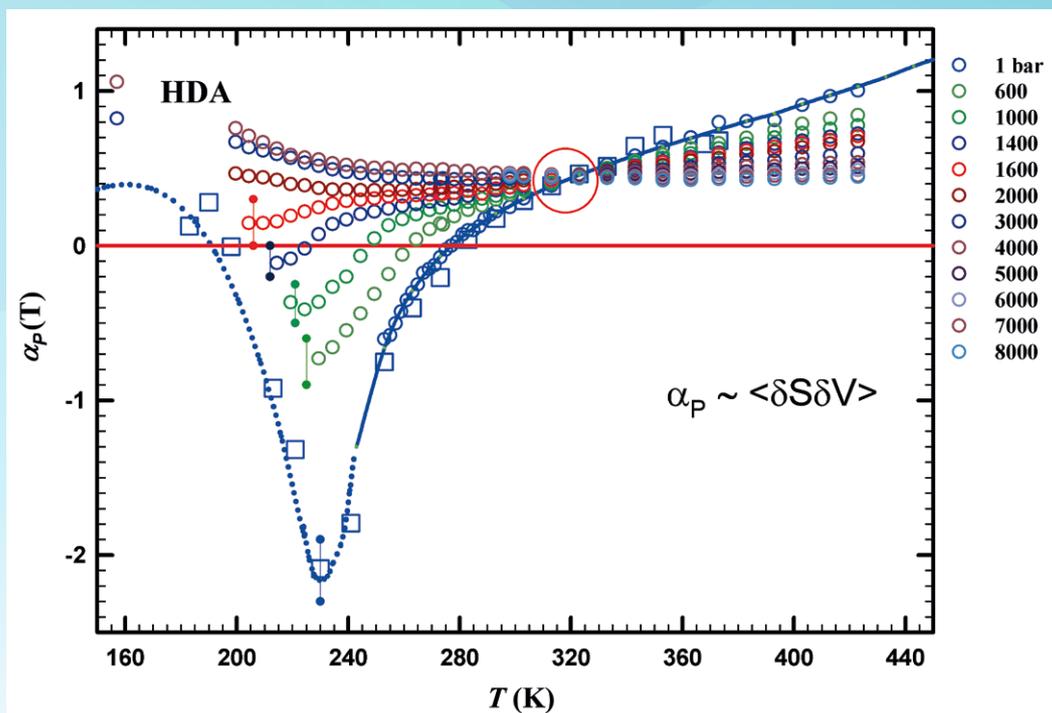


Fig. 4 Il coefficiente di espansione termica  $\alpha_p(T, P)$ , proporzionale alle correlazioni tra le fluttuazioni di entropia e di volume  $\langle \delta S \delta V \rangle$ . Come la  $\chi_T(T, P)$  anche questa funzione termodinamica propone per  $T^*$  un ruolo straordinario: tutte le curve rappresentanti  $\alpha_p(T)$  alle diverse pressioni si incrociano a  $T^*$  (dove  $\alpha_p = 0,44 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ). Per  $T > T^*$   $\alpha_p$  è monotona per tutte le pressioni studiate; qui l'acqua si comporta come tutti gli altri liquidi: la riduzione di  $\delta V$  dovuta all'aumento di  $P$  è compensata dalla crescita di  $\delta S$ , e quindi del disordine locale. Per  $T < T^*$  si evidenziano invece le anomalie del liquido e confermano il polimorfismo dell'acqua. I cambiamenti nelle fluttuazioni di entropia riflettono la crescita dei clusters tetraedrici generati dall'HB, di densità più bassa rispetto al resto del liquido. Queste sono le ragioni del minimo di  $\rho$  osservato in acqua confinata, dei valori di bassa densità che caratterizzano la fase liquida ultra-viscosa e del polimorfismo dell'acqua amorfa per  $T < T_x$ . Il crescere delle pressioni ha invece effetti opposti portando a una progressiva riduzione degli effetti associati all'HB.

valori, mentre alle alte rimane quasi costante. Qui l'acqua si comporta come tutti gli altri liquidi: la riduzione di  $\delta V$  dovuta all'aumento di  $P$  è compensata dalla crescita di  $\delta S$ , e quindi del disordine locale.

Per temperature minori di  $T^*$  si evidenziano invece le anomalie del liquido: i) per  $P = 1$  bar, partendo da  $T^*$ ,  $\alpha_p$  cambia il "rate" della propria curvatura negativa; ii) a  $T_m$  assume valori negativi che crescono nella loro ampiezza nella fase sottoraffreddata; iii) i dati relativi all'acqua confinata si raccordano con quella di bulk mostrando però un minimo a 230 K e riprendendo valori positivi intorno ai 200 K. I valori negativi si hanno solo per  $P < 1,5$  kbar e il minimo nella fase sottoraffreddata sembra mantenersi fino a 1,6 kbar. Per pressioni maggiori a questa ultima  $\alpha_p$  cambia assumendo una definitiva e crescente curvatura positiva partendo proprio da  $T^*$ . Se guardiamo alle fluttuazioni il cambio di segno della espansività è legato essenzialmente a quelle di entropia che riflettono la crescita dei clusters tetraedrici generati dall'HB. Tali clusters di densità più bassa rispetto al resto del liquido, come provato da misure spettroscopiche, crescono alle basse pressioni in dimensioni e stabilità (tempo di vita) al ridursi di  $T$ . In condizioni ambientali il tempo di vita dell'HB è di pochi

picosecondi e cresce esponenzialmente al diminuire di  $T$  (a 200 K i suoi valori sono dell'ordine dei microsecondi) [21]. Queste sono le ragioni del minimo di  $\rho$  osservato in acqua confinata, dei valori di bassa densità che caratterizzano la fase liquida ultra-viscosa e del polimorfismo dell'acqua amorfa per  $T < T_x$ . Il crescere delle pressioni ha invece effetti opposti portando a una progressiva riduzione degli effetti associati all'HB. Dalle due funzioni termodinamiche  $\chi_T(P, T)$  e  $\alpha_p(P, T)$  (fig. 3 e fig. 4), e dalla stessa densità (fig. 2) si evince che alle alte pressioni ( $P > 1,6$  kbar) le proprietà dell'acqua assumono quei comportamenti che caratterizzano di norma tutti i materiali nella fase liquida.

#### 4 I modelli e le ipotesi correnti

Fin dai primi modelli è stato proposto che i comportamenti dell'acqua sono riconducibili alla specificità dell'HB [22]. Oggi le teorie più accreditate sono tre: a) *stability limit* [23], b) *singularity-free* [24] e c) *liquid-liquid (LL) phase transition* [25]. La prima e la seconda nascono da osservazioni sperimentali mentre la terza da studi di dinamica molecolare (MDS).

Nel primo caso viene ipotizzato che la linea spinodale ( $T_s(P)$ ) sia caratterizzata, nel diagramma di fase ( $P$ - $T$ ), da un comportamento "rientrante" e si congiunga a  $P$  negative alla spinodale liquido-gas dell'acqua super-riscaldata, inoltre il liquido non può esistere se raffreddato oltre  $T_s(P)$  (i.e. limite di stabilità). Il secondo modello, invece, ipotizza che le variazioni fra differenti stati polimorfici somiglino, ma non lo sono, a vere transizioni di fase. L'acqua viene assimilata a un gel transiente fatto di molecole tenute insieme dall'HB, si formano dei clusters e come  $T$  diminuisce cresce sia il numero di legami quanto la dimensione di questi "patches" locali, portando a fluttuazioni di volume specifico e di entropia con correlazioni incrociate le cui anomalie uguagliano quelle osservate (i.e. quanto suggerisce la espansività, fig. 2).

La specificità del terzo modello sta nella ipotesi di un secondo punto critico (Liquid Liquid Critical Point LLCP) dove la fase liquida si separa in due fasi distinte: una fase di liquido a bassa densità (*low-density liquid* LDL) a bassa pressione ed una seconda ad alta densità (*high-density liquid* HDL) alle alte  $P$ . Nelle vicinanze del suo "primo" punto critico ( $T = 647$  K) l'acqua è una miscela fluttuante di molecole le cui strutture locali somigliano rispettivamente a quelle della fase liquida e gassosa. Alla stessa maniera, vicino all'ipotizzato LLCP, si può rappresentare l'acqua come una miscela fluttuante di molecole la cui struttura locale è quella delle sue due fasi liquide (LDL ed HDL); le fluttuazioni associate a queste due fasi determinano le proprietà del liquido e quindi le sue anomalie.

Il punto critico (CP) è uno straordinario e complesso fenomeno naturale. Esso rappresenta il limite di esistenza di una sola fase, al di sotto (o sopra) esistono due fasi distinte e caratterizzate da valori differenti di entropia e volume specifico: le derivate prime parziali del potenziale di Gibbs ( $G(P, T)$ ); esse sono distinguibili solo se si considerano traiettorie che incrociano la linea di transizione di fase del primo ordine. Lungo tali traiettorie si ha una discontinuità non analitica (salto) nelle derivate prime della  $G(P, T)$ . Quindi il volume,  $V = (\partial G / \partial P)_T$ , non diminuisce in maniera continua con la pressione ma presenta un salto  $\Delta V$ , e vicino al CP  $\Delta V \rightarrow 0$ . Similmente l'entropia,  $S = (\partial G / \partial T)_P$ , invece di crescere con  $T$  presenta un salto di  $\Delta S$ , con  $\Delta S \rightarrow 0$  al CP. Il segno della quantità  $\Delta S / \Delta V$  determina la pendenza ( $\partial P / \partial T$ ) della linea della transizione di fase del primo ordine (equazione di Clapeyron  $\partial P / \partial T = \Delta S / \Delta V$ ).

Tali considerazioni sono verificabili per l'acqua con soluzioni analitiche e con la MDS. Sebbene di recente, proprio per alcuni risultati di MDS in apparenza incompatibili fra loro, si è aperto un aspro confronto sulla esistenza o meno dell'LLCP. Questo confronto ha sottolineato che la MDS può fornire solo suggerimenti non certezze e queste ultime stanno solo nell'esperimento. Comunque, l'identificazione

sperimentale della linea di transizione di fase del primo ordine in regimi di metastabilità non è semplice. L'acqua di bulk in teoria potrebbe essere raffreddata fino a  $T_h$ , prima che il liquido transisca alla fase solida. In realtà è possibile studiare le sue proprietà molto al di sotto della  $T_m$ , a basse pressioni si è arrivati a circa 240 K usando capillari o emulsioni dove l'acqua pura sta dentro gocce di 5–10  $\mu\text{m}$ , ma la *no man's land* (dove dovrebbe trovarsi l'LLCP) è al di fuori delle possibilità. Tale regione può essere esplorata con il *trucco* di confinare l'acqua in nanostrutture (pori) così piccole da evitare la formazione di centri di nucleazione. Con l'acqua confinata e con quella di idratazione delle proteine, come mostrato da recenti esperimenti, è invece possibile andare ben al di sotto dei 235 K. Potendo quindi esplorare quasi l'intero diagramma di fase è stato scoperto un ricco set di fenomeni dinamici e termodinamici, che hanno aperto nuovi orizzonti per la chimica-fisica del sistema [14, 26–30].

Da alcuni di questi esperimenti, in accordo con i suggerimenti MDS, emerge che l'LLCP si dovrebbe trovare pochi gradi al di sotto della  $T_h$ , ad una pressione intorno ai 1500 bar. Sebbene questo sia in conflitto con il fatto che le transizioni di fase normalmente separano due fasi distinte (liquide, solide o gassose) non due liquidi. Ma nulla osta a che il "meccanismo fisico" di separazione di un fluido a singola componente in un gas ed un liquido possa essere anche esteso alla separazione di un liquido in due liquidi rispettivamente di alta (HDL) e bassa densità (LDL). La ragione di questo è su basi microscopiche: i liquidi a simmetria locale tetraedrica (oltre all' $\text{H}_2\text{O}$ , anche il Si e l' $\text{SiO}_2$ ) sono caratterizzati da un potenziale a due minimi che sarebbe all'origine del "polimorfismo liquido". Proprio come nei colloidi dove esistono un CP *upper* e un CP *lower* nel diagramma di fase concentrazione-temperatura e la separazione avviene in due fasi liquide di differente concentrazione.

Come mostrato dalla fig. 2, per  $P > 1600$  bar la *no man's land* può essere esplorata integralmente guardando all'acqua contenuta nelle emulsioni (che è praticamente acqua di bulk). Quindi se il LLCP si trovasse vicino a questa pressione e a temperature  $T > 180$  K potrebbe essere esplorato.

## 5 I massimi nelle funzioni termodinamiche

### 5.1 Osservazioni sperimentali per l'acqua confinata

Un interessante tentativo sperimentale [7] sulla presenza dell'LLCP è stato effettuato nella regione  $T < T_h$  lungo la linea di fusione indotta dalla decompressione (FID) del ghiaccio IV. Da tali curve di FID sono state osservate discontinuità nella loro pendenza (un nodo corrisponde ad una grinza nella superficie di Gibbs ed identifica la transizione LL).

Altri esperimenti (scattering quasi elastico di neutroni (QENS), Raman, infrarosso e spettroscopia NMR) fatti in acqua confinata [25–28], accompagnati da calcoli su modelli di acqua di bulk [29], hanno studiato questa regione. Da essi è osservabile la presenza di un *crossover* dinamico a  $T_L = 225$  K (a 1 bar) dove il liquido, al diminuire di  $T$ , cambia i comportamenti dei suoi parametri di trasporto (coefficiente di self-diffusione  $D_S$  (NMR) e tempi di rilassamento  $\tau_T$  (QENS)) da super-Arrhenius ad Arrhenius (o da materiale che forma un vetro fragile a strong, da cui: Fragile-to-Strong Dynamic Crossover (FSDC)). Mentre spettri all'infrarosso (FTIR) hanno mostrato che l'acqua rimane liquida fino a circa 180 K, e individuato con certezza la presenza di due fasi liquide di cui una è la LDL, formata da molecole di acqua legate tramite HB in ben definiti clusters in cui ogni molecola è vertice di un tetraedro [26]. Proprio tale *crossover* delimita due regioni: per  $T < T_L$  il numero di molecole impegnate nel network tetraedrico è maggiore delle restanti legate parzialmente fra loro, mentre per  $T > T_L$  vale il viceversa. Essendo  $\tau_T$  proporzionale alla stabilità (rottura/formazione) dell'HB, il suo crescere, in termini di una legge di potenza, al diminuire di  $T$  per  $300 > T > 225$  K indica una crescente stabilità della fase LDL. Le due fasi comunque coesistono in questo regime di liquido superraffreddato, comportando una sua marcata disomogeneità dinamica.

È stata anche proposta (e verificata tramite la MDS) una correlazione tra FSDC e la cosiddetta "Widom line", definita nel piano  $P$ - $T$  come il luogo dei massimi nelle lunghezze di correlazione [30, 31], che nell'avvicinarsi del punto critico dovrebbero divergere. Essendo le funzioni di risposta termodinamiche proporzionali a potenze delle loro correlazioni, tale linea sarebbe asintoticamente vicina al locus dei massimi nelle funzioni termodinamiche quale *e.g.* la compressibilità. Una tale realtà, con la Widom line che termina all'LLCP non è stata comunque mai osservata per vie sperimentali.

I dati di scattering e di NMR mostrano invece che la temperatura dello FSDC coincide con la violazione della ben nota relazione di Stokes-Einstein (SEV)  $D_S = k_B T / 6\pi\eta R$  che lega linearmente fra loro i parametri di trasporto  $D_S$  e  $\eta$ . Il disaccoppiamento fra queste grandezze si accompagna a forti fluttuazioni di densità ed alla crescita delle lunghezze di correlazione. In altre parole, il liquido raffreddato si porta all'arresto dinamico in una maniera disomogenea, essendo caratterizzato dallo sviluppo al suo interno di eterogeneità dinamiche: il moto interatomico è correlato nello spazio ma i modi traslazionali e quelli rotazionali si disaccoppiano. Si originano delle aree in cui i tempi di rilassamento strutturale differiscono di diversi ordini di grandezza dai valori medi dell'intero sistema (queste eterogeneità originano la SEV). Alle più basse  $T$  la Stokes-Einstein è sostituita con una legge

di potenza del tipo  $D_S \sim (\eta/T)^{-\xi}$ , la cosiddetta SE frazionata. Da un confronto fra dati sperimentali (FTIR) e uno studio MD su due modelli molecolari dell'acqua (TIP5P e Jagla) [31] è stato mostrato che l'SE frazionata si origina in concomitanza dello svilupparsi della fase LDL confermando che dentro la *no man's land* la fisica del sistema è dovuta a variazioni specifiche nella sua struttura locale.

L'ipotesi di un forte cambiamento, entro questa regione, nelle proprietà dinamiche dell'acqua liquida era stata già intuita in passato [32]. A differenza di altri materiali "network-forming" [33], l'acqua si comporta come un liquido fragile in tutta la finestra di temperatura accessibile sperimentalmente. Considerando le analogie con altri liquidi "network-forming" e le proprietà delle sue forme amorfe era ragionevole che, a pressione ambiente, l'acqua di bulk cambiasse da fragile (ad alte  $T$ ) a forte (basse  $T$ ) [32] proprio nella regione di super-raffreddamento sotto  $T_h$ . Il *crossover* dinamico è stato anche osservato in Si ed SiO<sub>2</sub> [33] utilizzando gli stessi potenziali a due scale usati per l'acqua.

Lo scattering di neutroni in acqua confinata è stato poi utilizzato per verificare la evoluzione del FSDC, e quindi della Widom line in funzione della pressione [26]; nella fig. 1 sono mostrati (quadrati neri) i risultati corrispondenti e la curva  $T_L(P)$  e la stima della collocazione del LLCP ( $P_C = 1600 \pm 40$  bar e  $T_C = 200 \pm 10$  K). Se guardiamo alla fig. 2 è certamente sorprendente che tale punto critico (suggerito da esperimenti nel liquido confinato in nanotubi) si collochi proprio a quelle pressioni dove la  $\rho(T)$  cambia curvatura cioè: da concava a convessa.

Che la Widom line sia il punto di massimo nelle fluttuazioni è stato suggerito dal calcolo tramite MDS del calore specifico del liquido dentro la zona di temperatura inaccessibile sperimentalmente:  $C_p$  ha infatti un massimo a  $T_L$  [34]; la stessa cosa dovrebbe valere per la compressibilità se esistesse davvero un LLCP.

Gli esperimenti in acqua confinata hanno mostrato, ad 1 bar, non solo la Widom line, il FSDC e la SEV ma hanno anche confermato la presenza a  $T_L$  del massimo nel  $C_p$  configurazionale ottenuto usando l'NMR *proton chemical shift*  $\delta(T)$  misurato [35].  $\delta$  rappresenta la geometria molecolare locale o l'ordine degli HB (provieni direttamente dal tensore di *shielding* magnetico) quindi  $-\ln\delta(T)$  "misura" la entropia configurazionale e la sua derivata  $-(\partial \ln\delta / \partial T)_p$  il corrispondente calore specifico. Il risultato conferma pienamente tale congettura e mostra infatti un pronunciato massimo in  $C_p$  nelle vicinanze della Widom line.

Riassumendo, dai dati di densità abbiamo calcolato la compressibilità isoterma e la espansività, quantità legate alle fluttuazioni di volume la prima ed a quelle incrociate di volume e di entropia la seconda. La seconda dimostra in maniera indubbia una crescita di ordine al

diminuire della temperatura, contrastata dal crescere della pressione supportando in maniera sostanziale la ipotesi di un polimorfismo nel liquido e cioè due liquidi, LDL e HDL coesistenti fra loro con il primo che domina la fase sottoraffreddata. La ipotesi se essi diano origine o meno all'LLCP può essere verificata dalla esistenza di un massimo nella  $\chi_T(P, T)$  alla Widom line. Come vedremo nel seguito questo massimo esiste effettivamente ed è localizzato proprio alla giusta temperatura. Al fine di evitare una qualunque speculazione riguardo a ipotetici effetti dovuti al confinamento tutte le discussioni a venire riguarderanno solo ed esclusivamente acqua liquida di bulk nella fase sottoraffreddata.

## 5.2 Il massimo nella compressibilità isoterma: misure nell'acqua di bulk

$\chi_T(P, T)$  può essere ottenuta sia dai dati di densità quanto da esperimenti di scattering o di propagazione del suono. Nel caso dello scattering elastico essa è legata al fattore di struttura  $S(Q)$  misurato a  $Q = 0$ , tramite la ben nota relazione  $S(0) = k_B T n \chi_T$ , dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann ed  $n$  è la densità molecolare,  $Q$  è il momento (o vettore d'onda) scambiato. Nella propagazione del suono,  $\chi_T$  ed  $\alpha_p$  sono invece legate al calore specifico, alla compressibilità adiabatica  $\chi_S$  e alla velocità del suono  $v$ , tramite

$$(3) \quad v^2 = 1/\rho\chi_S = C_p/\rho\chi_T C_v, \\ \chi_T = \chi_S + TV\alpha_p^2/C_p \quad \text{o} \quad \chi_T = 1/\rho v^2 + T\alpha_p^2/\rho C_p.$$

Gli esperimenti di scattering in acqua di bulk sottoraffreddata sono caratterizzati da una forte dispersione del suono; ossia una forte dipendenza della velocità sia dalla quantità di moto (momento  $Q$ ) quanto dalla energia (o frequenza  $\omega$ ) scambiati tra la molecola di acqua e la particella di *probe* (fotone o neutrone):  $v = v(Q, \omega)$ .

Questo comportamento viscoelastico è osservabile in esperimenti di scattering di Brillouin e di propagazione del suono, fatti a pressione ambiente, nell'intervallo di frequenza,  $10^4 - 10^{13}$  Hz, infatti per  $240 < T < 340$  K, si osserva come  $v$  dipenda fortemente da  $Q$  e da  $\omega$ . Per  $Q > 1 \text{ nm}^{-1}$ , sono osservabili contemporaneamente sia un modo acustico con velocità "ordinaria" ( $v_{us}$  di circa 1600 m/s, misurata da esperimenti di ultrasuoni tra  $10^4$  e  $10^6$  Hz) e un secondo con velocità vicina a quella del ghiaccio amorfo ( $v_{hf}$  di circa 3200 m/s però osservata a  $\omega > 10^9$  Hz). Questo è stato collegato alla simultanea presenza delle due strutture LDL e HDL. La velocità associata alle alte frequenze cresce lentamente come  $T$  diminuisce; mentre la  $v_{us}$  prima diminuisce al diminuire della temperatura poi invece mostra una dispersione positiva e un minimo ad una certa  $T$ . Quello

che si osserva è che la temperatura del minimo è dipendente dal  $Q$  del probe,  $Q_{exp}$ , e per ognuno di questi vettori d'onda la velocità del suono  $v(Q, \omega)$  evolve dai valori  $v_{us}$  a quelli di alta frequenza  $v_{hf}$  come una funzione della decrescente temperatura.

Questi esperimenti di scattering misurano, come è noto, il fattore di struttura dinamico  $S(Q, \omega)$  (la trasformata di Fourier della funzione di correlazione spazio-temporale  $G(r, t)$ ) ed il suo contributo inelastico è caratterizzato da un forte allargamento al diminuire di  $T$ . Questo è il risultato di processi di rilassamento che evolvono su scale spazio-temporali, corrispondenti al reciproco delle rispettive frequenze, come è tipico dei modi longitudinali.

A diminuire di  $T$ , ed al crescere di  $Q$ , il rilassamento strutturale spinge la transizione del modo longitudinale  $v(Q, T)$  dal suo limite adiabatico  $v_{us}$  al suo limite di alta frequenza  $v_{hf}$ . Questi comportamenti si osservano di norma nei liquidi *glass-forming* (nella fase sottoraffreddata dove avviene la transizione visco-elastica). Tale rilassamento strutturale è anche alla base della universalità del FSDC di tutti i liquidi sottoraffreddati [36].

La dispersione sonora si riflette nella compressibilità isoterma come  $\chi_T(Q, \omega)$  ed è rilevante nel comprendere la termodinamica dell'acqua. Sono gli effetti del suo polimorfismo nei rilassamenti strutturali che la propagazione del suono permette di osservare, e come nel caso dei fenomeni critici riflettono le dinamiche delle fluttuazioni, in particolare quelle di densità. Conoscendo  $\rho$ ,  $\alpha_p$  e  $C_p$  è facile calcolare la  $\chi_T(Q, T)$  illustrata in fig. 5, dove si osserva un massimo (uno per ogni  $Q$  usato e la cui temperatura diminuisce al suo diminuire). Allo stesso tempo, si può osservare che riducendo  $Q$ , il valore massimo della compressibilità isoterma,  $\chi_T^{max}$ , si avvicina sempre di più al valore di quella idrodinamica (linea continua). La temperatura limite a cui la compressibilità dell'acqua di bulk raggiunge il suo valore massimo nel limite idrodinamico ( $Q \rightarrow 0$ ) è stata stimata considerando la temperatura del massimo in  $\chi_T(T^{max})$  e una lunghezza di correlazione ( $\xi$ ) corrispondente alla estensione media della struttura rilassante (network tetraedrico della fase LDL) osservata allo specifico valore del  $Q$  usato.

Dai modelli di scattering si ha che  $\xi \propto 1/Q$  e quindi una analisi della curva  $\xi$  vs.  $1/T^{max}$  può fornire quanto cercato. È stato verificato che tale curva si identifica nella stessa legge di potenza della teoria di *mode-coupling* (MCT) usata per ottenere la temperatura del FSDC tramite parametri di trasporto misurati (e.g.  $\xi \cong \varepsilon^{-\theta}$ , con  $\varepsilon = (|T - T_c|/T_c)$  [32, 37]). Il formalismo MCT è stato largamente, e con successo, usato nello studio dei fenomeni critici e in particolare negli esperimenti di scattering sia elastico che dinamico. Il valore di temperatura ottenuto in questo caso

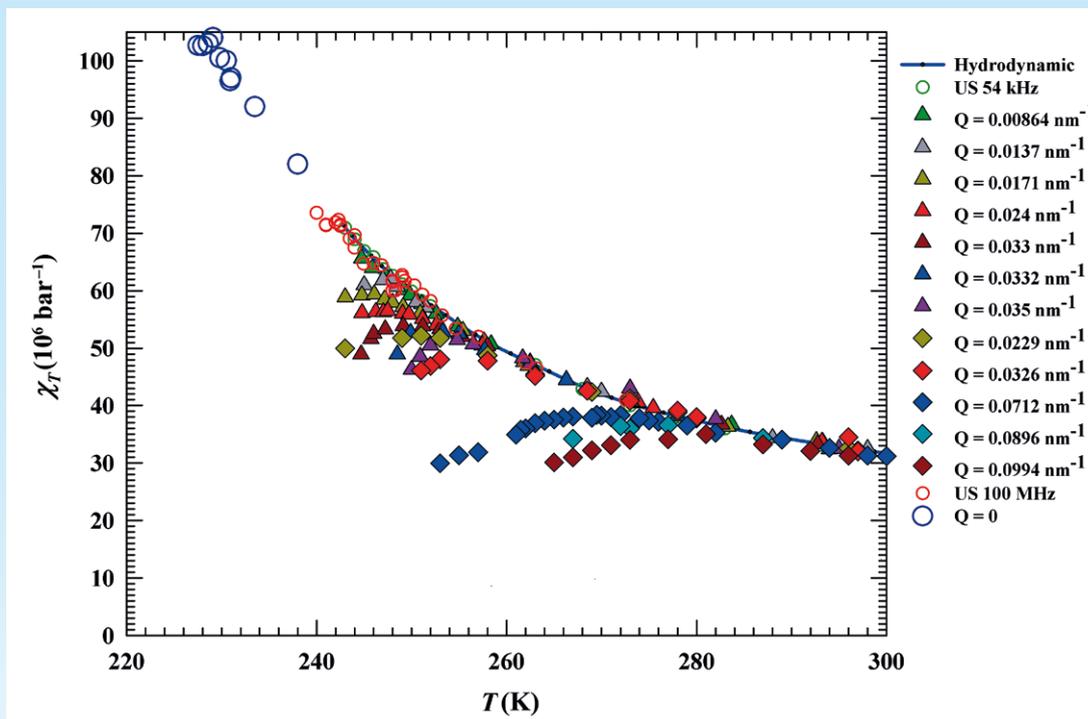


Fig. 5 La compressibilità  $\chi_T(Q, \omega)$ , misurata a 1 bar, sia dai dati di densità (regime idrodinamico), quanto da esperimenti di propagazione del suono o di scattering in diversi regimi di frequenza e momento scambiato. La figura mostra la presenza di un massimo per ogni  $Q$  usato, la cui temperatura diminuisce al suo diminuire. Si vede inoltre che riducendo  $Q$ , il valore massimo della compressibilità isoterma,  $\chi_{Tmax}$ , si avvicina sempre di più al valore di quella idrodinamica (linea continua crescente al decrescere di  $T$ ) dando evidenza di un possibile massimo assoluto a  $Q = 0$ . Tale comportamento dovuto interamente ai processi di rilassamento dinamico delle strutture tetraedriche dell'acqua conferma il polimorfismo del liquido quanto la "criticità" nella termodinamica del sistema. I rilassamenti strutturali come nel caso dei fenomeni critici riflettono le dinamiche delle fluttuazioni, in particolare quelle di densità, e quindi tale massimo assoluto doveva localizzarsi nel luogo del massimo delle fluttuazioni e cioè a  $T_L$ , la temperatura della Widom line. Tale ipotesi è stata confermata da un esperimento SAXS,  $S(Q \rightarrow 0)$ , i cui dati sono riportati nella figura, ed il massimo è stato osservato a circa 227 K.

( $\xi$  vs.  $1/T^{max}$ ) è  $T_c = 228 \pm 5$  K e  $\theta \approx 2$ ; questa temperatura è approssimativamente la stessa del minimo in  $\alpha_p$  e dei massimi in  $C_p$  e  $\Delta(T) = T\alpha_p^2/\rho C_p$  misurati però in acqua confinata. È sorprendente che questa "temperatura di crossover" caratterizzante le funzioni di risposta e parametri termodinamici sia stata misurata nell'acqua confinata con esperimenti ben dentro la *no man's land* e proposta allo stesso tempo da dati misurati nel bulk fino a circa 240 K.

Va comunque sottolineato che i dati (e la loro analisi) riportati nella fig. 5, ovviamente provenienti solo dall'acqua di bulk, confermano il polimorfismo del liquido (la presenza della fase LDL che diviene sempre più determinante al diminuire della temperatura) quanto la "criticità" nella termodinamica del sistema.

Il suggerimento della presenza di un massimo di  $\chi_T$  nel regime idrodinamico ha ricevuto conferma giusto pochi mesi addietro tramite un esperimento SAXS che ha usato impulsi della durata di qualche femtosecondo provenienti da un laser a raggi X e focalizzati su sferette di acqua delle dimensioni di  $\sim 14 \mu\text{m}$  [21] per misurare il loro fattore di struttura statico

$S(Q)$  (la trasformata di Fourier della funzione di correlazione densità densità  $g(r)$ ). Tali goccioline, in accordo a una precisa procedura sperimentale [21] possono essere sottoraffreddate, sotto vuoto, fino a 227 K. Quindi, tramite le relazioni  $S(0) = k_b T n \chi_T$  e la ben nota forma di Ornstein-Zernike (OZ) ( $S_{OZ} \propto 1/(\xi^{-2} + Q^2)$ ), dallo spettro dei fononi scatterati sono stati calcolati, nel limite  $Q \rightarrow 0$ , sia  $\chi_T$  quanto la lunghezza di correlazione  $\xi$ . Entrambe queste grandezze, in accordo a quanto suggerito dai dati di propagazione del suono (fig. 5), mostrano dei massimi, nella loro evoluzione in funzione della temperatura a circa 229 K per l' $\text{H}_2\text{O}$  e 233 K per la  $\text{D}_2\text{O}$ .

In sostanza entrambi gli esperimenti di scattering, uno dinamico, Brillouin Scattering, e l'altro statico, SAXS, coerentemente confermano quanto suggerito riguardo allo sviluppo e crescita nel liquido delle strutture tetraedriche e la esistenza della Widom line definita come il luogo delle massime lunghezze di correlazione che si sviluppano dall'LLCP alle pressioni positive nel regime di profondo sottoraffreddamento e quindi la ipotesi della esistenza dell'LLCP.

## Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare tutti i colleghi e gli studenti che hanno contribuito allo sviluppo ed alla verifica delle idee esposte. In particolare Prof. Paolo V. Giaquinta per

i molteplici e fruttuosi suggerimenti riguardanti sia i contributi di Galileo Galilei e dei suoi allievi per i primi studi sulla densità dell'acqua [1, 2], quanto per il lavoro di Pierce W. Bridgman [13].

## Bibliografia

- [1] G. Galilei, "Intorno alle cose, che stanno in sù l'acqua, ò che in quella si muovono". Discorso al Serenissimo Don Cosimo II Gran Duca di Toscana (Cosimo Giunti, Firenze) 1612.
- [2] L. Magalotti, "Esperienze intorno agli artificiali agghiacciamenti", Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento sotto la protezione del Serenissimo principe Leopoldo di Toscana e descritte dal segretario di essa accademia (Giuseppe Cocchini all'Insegna della stella, Firenze) 1667, pp. 127-176.
- [3] P. G. Debenedetti, H. E. Stanley, "The physics of supercooled and glassy water", *Phys. Today*, 56 (2003) 40.
- [4] F. Mallamace, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106 (2009) 15097.
- [5] P. G. Debenedetti, "Metastable Liquids: Concepts and Principles" (Princeton University Press, Princeton) 1996.
- [6] F. Mallamace, H. E. Stanley, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course CXXXIV, *The Physics of Complex Systems* (IOS Press, Amsterdam; SIF, Bologna) 1997; F. Mallamace, H. E. Stanley, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course CLV, *The Physics of Complex Systems (New Advances and Perspectives)* (IOS Press, Amsterdam; SIF, Bologna) 2004; F. Mallamace, H. E. Stanley, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, Course CLXXVI, *Complex Materials in Physics and Biology* (IOS Press, Amsterdam; SIF, Bologna) 2012.
- [7] F. Mallamace, C. Corsaro, D. Mallamace, H. E. Stanley, S. H. Chen, "Water and Biological Macromolecules", *Adv. Chem. Phys.*, 152 (2013) 263.
- [8] P. J. Flory, "Principles of Polymer Chemistry" (Cornell University Press, Ithaca) 1953; P. J. Flory "Statistical mechanics of chain molecules" (Butterworth-Heinemann, Oxford) 1969.
- [9] P. G. de Gennes, "Scaling Concepts in Polymer Physics" (Cornell University Press, Ithaca) 1979.
- [10] R. J. Speedy, C.A. Angell, *J. Chem. Phys.*, 65 (1976) 851.
- [11] E. F. Burton, W. F. Oliver, *Proc. R. Soc. A*, 153 (1936) 166.
- [12] O. Mishima, L. D. Calvert, E. Whalley, *Nature*, 310 (1984) 393; *Nature*, 314 (1985) 76; *Nature*, 384 (1996) 546.
- [13] P. W. Bridgman, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, 47 (1912) 441.
- [14] F. Mallamace et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104 (2007) 18387.
- [15] T. Grindley, J. E. Lind, *J. Chem. Phys.*, 54 (1971) 3983.
- [16] G. S. Kell, *J. Chem. Eng. Data*, 20 (1975) 97; G. S. Kell, E. Whalley, *J. Chem. Phys.*, 62 (1975) 3496.
- [17] C. M. Sorensen, *J. Chem. Phys.*, 79 (1983) 1455; D. E. Hare, C. M. Sorensen, *J. Chem. Phys.*, 84 (1986) 5085; *J. Chem. Phys.*, 87 (1987) 4840.
- [18] O. Mishima, *J. Chem. Phys.*, 133 (2010) 144503.
- [19] F. Mallamace, C. Corsaro, H. E. Stanley, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 110 (2013) 4899.
- [20] K. H. Kim et al., *Science*, 358 (2017) 1589.
- [21] S. Cerveny, F. Mallamace, J. Swenson, L. Xu, *Chem. Rev.*, 116 (2016) 7608.
- [22] D. Eisenberg, W. Kauzmann, "The Structure and Properties of Water" (Oxford University Press, Oxford) 1969.
- [23] R. J. Speedy, *J. Phys. Chem.*, 86 (1982) 982.
- [24] S. Sastry, P. Debenedetti, F. Sciortino, H. E. Stanley, *Phys. Rev. E*, 53 (1996) 6144.
- [25] P. H. Poole, F. Sciortino, U. Essmann, H. E. Stanley, *Nature*, 360 (1992) 324.
- [26] A. Faraone et al., *J. Chem. Phys.*, 121 (2004) 10843; L. Liu et al., *Phys. Rev. Lett.*, 95 (2005) 117802.
- [27] F. Mallamace et al., *J. Chem. Phys.*, 124 (2006) 161102; S.-H. Chen et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 103 (2006) 12974.
- [28] F. Mallamace et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104 (2007) 424.
- [29] F. Mallamace et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 105 (2008) 12725.
- [30] L. Xu et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 102 (2005) 16558.
- [31] L. Xu et al., *Nat. Phys.*, 5 (2009) 565.
- [32] K. Ito, C. T. Moynihan, C. A. Angell, *Nature*, 398 (1999) 492.
- [33] S. Sastry, C. A. Angell, *Nat. Mater.*, 2 (2003) 739; I. Saika-Voivod, P. H. Poole, F. Sciortino, *Nature*, 412 (2001) 514.
- [34] P. Kumar et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 104 (2007) 9575; *Phys. Rev. Lett.*, 97 (2006) 177802.
- [35] F. Mallamace et al., *J. Chem. Phys.*, 127 (2007) 045104; *J. Phys. Chem. B*, 114 (2010) 1870; C. Corsaro et al., *J. Phys. Chem. B*, 112 (2008) 10449.
- [36] F. Mallamace et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107 (2010) 22457.
- [37] S. H. Chong, *Phys. Rev. E*, 78 (2008) 041501.

### Francesco Mallamace

Francesco Mallamace è Ordinario di Fisica Generale all'Università di Messina e responsabile del Centro NMR-Sistemi Complessi del CNR-INFN-UNIME. È *Affiliate Professor* al Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Nuclear Science and Engineering e *Visiting Professor* al Center for Polymer Studies della Boston University. Ha studiato a Messina, Roma e Boston. Durante la sua carriera si è interessato ai liquidi e sistemi complessi che ha studiato tramite differenti tecniche sperimentali: scattering di luce e neutroni, viscoelasticità, *sound propagation* e spettroscopia di risonanza magnetica nucleare.

## THE ORIGINS OF THE INFN PADUA UNIT

**ALESSANDRO BETTINI**

*Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei", Università di Padova, Padova, Italia  
INFN, Sezione di Padova, Padova, Italia*

We reproduce here below an article by Antonio Rostagni dating back to 1988, as a witness in the post-World War II period of one of the paths that led to the rebirth of physics in Italy and to the creation of INFN (National Institute of Nuclear Physics), which was to become one of the world leading scientific organizations.

Riproduciamo qui un articolo di Antonio Rostagni di trent'anni fa, come testimonianza di uno dei diversi percorsi che, nel dopoguerra, portarono alla rinascita in Italia della fisica e alla creazione dell'INFN. L'articolo apparve sul "Notiziario INFN" nella rubrica *Rassegna di attività*, che era dedicata, in ciascun numero, non solo all'attività, ma anche alla storia di un Laboratorio Nazionale o di una Sezione. Le pubblicazioni del "Notiziario" si interruppero, per l'improvvisa scomparsa del direttore Stainislao Stipchich, con il n. 1-2 nel marzo 1988, per cui Stipchich aveva programmato la Sezione di Padova. Come direttore della Sezione, scrissi l'articolo sull'attività sperimentale e chiesi al Prof. Rostagni quello sulla storia. Fu il suo ultimo scritto, perché pochi mesi dopo, il 5 dicembre dello stesso anno, egli ci lasciò.

Antonio Rostagni, nato a Novara il 14 luglio 1903 e formatosi a Torino, insegnò fisica sperimentale (oggi fisica generale) a Messina dal 1935 al 1938. In quell'anno si trasferì a Padova, dove tenne la stessa cattedra, lasciata forzatamente da Bruno Rossi per le orrende leggi razziali, e fu il Direttore dell'Istituto di Fisica sino alla pensione nel 1973. Cessato l'insegnamento, continuò comunque ad assicurare i suoi contributi come professore emerito, nel grande studio progettato a suo tempo da Rossi<sup>1</sup> come lo Studio del Direttore. Fu uno dei fondatori dell'INFN, nel 1951, ne fu vicepresidente dal 1956 al 1958 e direttore della Sezione

<sup>1</sup> Per descrizioni del progetto dell'edilizia e dei numerosi laboratori sperimentali e relative attrezzature vedi: B. Rossi, "Il nuovo Istituto di Fisica della R. Università di Padova", *La Ricerca Scientifica* (1937) 220 e A. Drigo, "L'Istituto di Fisica della R. Università di Padova", *L'Energia elettrica*, Gennaio 1939, pag. 46-63.



Antonio Rostagni, Gleb Wataghin, Enrico Persico, Enrico Fermi, Matilde Rostagni;  
Gressoney la Trinité, Dicembre 1932.

di Padova dalla sua istituzione nel 1951 al 1963<sup>2</sup>. Dal 1958 al 1959 fu Direttore della Divisione Ricerca dell'International Atomic Energy Agency (IAEA) a Vienna. Diede contributi scientifici alla fisica terrestre, dei raggi cosmici e delle onde elettromagnetiche.

Dopo la tragedia della seconda guerra mondiale, nelle condizioni difficilissime di un Paese che usciva distrutto da una dittatura e da una guerra perduta, la fisica non solo rinacque, ma fu organizzata con strutture tali da farla divenire, in non molti anni, una delle principali nel mondo. Il merito fu di poche illuminate persone, i Padri fondatori dell'INFN, la struttura che permise lo sviluppo della ricerca, non solo nelle loro quattro sedi, ma gradualmente in tutta l'Italia. Già quand'erano giovani, prima della guerra, si erano conosciuti, anche fuori del lavoro. La foto sopra mostra tre di loro, Rostagni, Wataghin e Persico, che, con la signora Rostagni e Fermi, si godono una giornata di sole d'inverno a Gressoney, prima di ridiscendere a valle con gli sci.

Ricordo in proposito un'idea di base, che Rostagni ci disse più volte gli fosse stata di guida. In Italia, diceva, nella storia passata, abbiamo avuto giganti della fisica, come Galilei, Volta, Avogadro, ma non abbiamo mai avuta una vera scuola di fisica, come quelle di altri paesi; l'INFN l'abbiamo fatta anche per cercare che se ne sviluppassero. Possiamo ben dire che ci riuscirono ed esserne loro grati.

<sup>2</sup> Per uno studio del periodo vedi: G. Peruzzi e S. Talas, "The Italian contributions to cosmic-ray physics from Bruno Rossi to the G-Stack. A new window into the inexhaustible wealth of nature", *Riv. Nuovo Cimento*, 30 (2007) 197.

## LE ORIGINI DELLA SEZIONE DI PADOVA DELL'INFN

L'Istituto di Fisica di Padova, che doveva diventare sede della locale Sezione dell'INFN, fu costruito nell'immediato anteguerra quando ne era direttore Bruno Rossi. Nominato giovanissimo professore in questa sede, nel 1933, Rossi poté continuarvi senza interruzione le ricerche sui raggi cosmici, nelle quali si era affermato, ricerche che non richiedevano allora attrezzature stabili impegnative. L'istituto era sistemato in vecchi locali del Palazzo Centrale Universitario. Rettore dell'Università era Carlo Anti, archeologo, che si stava ponendo il problema di un rinnovo edilizio dell'intero complesso universitario.

Fra le necessità più urgenti si poneva proprio quella di un nuovo Istituto di Fisica, e così Rossi poté dare le sue indicazioni per il progetto, avendo presenti i criteri adottati nei più moderni Istituti europei. Ultimata la costruzione e l'attrezzatura di base, egli volle solennizzare l'apertura del nuovo Istituto presentandolo ai colleghi delle Università italiane nella primavera del 1937. Io ci venni da Messina, e ricordo che ebbi un'impressione molto favorevole della impostazione di base, sia nei riguardi delle possibilità di ricerca sia dell'attività didattica. Ero particolarmente interessato a questi problemi in quanto avevo in vista una sistemazione dell'Istituto di Messina, dove pensavo di rimanere per parecchi anni a venire.

L'anno seguente, in estate, il governo italiano emanò la iniqua legge razziale che, in particolare, escludeva gli israeliti dall'insegnamento universitario. Così Rossi si trovò, con Emilio Segrè ed altri, privato dalla cattedra e costretto ad emigrare. Da Padova se ne andò pure S. Debenedetti, che era stato negli ultimi anni il suo più diretto collaboratore.

Nel Dicembre di quello stesso anno (1938) fui trasferito a Padova e da Palermo venne anche Giancarlo Wick alla cattedra di Fisica Teorica. Non trovammo giovani già avviati in qualche attività di ricerca e ci dedicammo intanto a organizzare gli insegnamenti, in attesa di individuare, tra i laureandi, quelli che sembrassero rivelare attitudini alla ricerca. La situazione politica si evolveva intanto in modo preoccupante: nel settembre 1939 scoppiava la guerra e nel giugno 1940 vi entrava anche l'Italia. I giovani che si laureavano venivano regolarmente chiamati alle armi, e non si poteva pensare ad avviare attività impegnative. Nell'Ottobre 1940 Wick fu trasferito a Roma, al posto di Fermi che aveva lasciato l'Italia per gli Stati Uniti. A Padova venne da Torino, come incaricato per la Fisica teorica, N. Dallaporta. La situazione divenne gravissima nel 1943 con l'occupazione tedesca e i ripetuti bombardamenti, che fortunatamente risparmiarono l'Istituto.

Finita la guerra, nel secondo semestre 1945 ritornarono, uno dopo l'altro, alcuni fra i laureati del quinquennio, che avevano subito vicissitudini più o meno drammatiche e che ora aspiravano ad iniziare un'attività scientifica. Ho ben presente alla memoria il duro inverno 1945-46; volevamo comunque farci un quadro aggiornato delle ricerche di fisica nel mondo e delle eventuali novità intervenute ultimamente, per poi decidere un piano d'azione scegliendo un campo di lavoro che offrisse prospettive abbastanza vaste, senza richiedere in partenza attrezzature importanti né capacità acquisite da un prolungato addestramento. Si pensava a prospettive vaste perché l'Istituto in sé offriva ampio spazio, e si aveva la sensazione che il numero dei giovani interessati sarebbe rapidamente aumentato.

Apparve perciò come campo più adatto a queste condizioni quello dei raggi cosmici, sebbene nessuno dei presenti ne avesse avuta un'esperienza diretta. Si iniziò subito il lavoro, sia nel campo teorico che in quello sperimentale, affrontando qualcuno dei problemi che dai più recenti lavori apparivano dibattuti.

Come primi frutti di questo inizio d'attività si ebbero l'accoglimento da parte del CNR della domanda di istituire a Padova un Centro di studio che fu chiamato degli Ioni Veloci (febbraio 1947), regolarmente finanziato, sia pure in misura modesta, e l'invito da parte del British Council al direttore dell'Istituto a visitare laboratori inglesi per ristabilire i contatti con i fisici di quel paese. Questo viaggio ebbe luogo in febbraio-marzo 1948, con visita ai laboratori di Londra, Oxford, Bristol, Manchester, Birmingham e Cambridge.

Risultati immediati del viaggio furono da un lato una più chiara conoscenza di quella che era stata l'evoluzione delle ricerche fisiche nell'ultimo quinquennio e di quelle che erano le tendenze prevalenti attuali, e d'altro lato lo stabilirsi di legami con determinati gruppi. In particolare con quello di P. M. S. Blackett, allora professore a Manchester, che aveva fra l'altro sviluppato l'uso della camera di Wilson con campo magnetico, e con quello di C. F. Powell a Bristol, specializzato nell'applicazione di emulsioni fotografiche allo studio dei raggi cosmici, che aveva appena scoperto il mesone  $\pi$ , come genitore del leptone  $\mu$ : un gruppo molto attivo, nel quale ebbi il piacere di ritrovare, dopo molti anni, G. Occhialini.

Questo gruppo, collaborando con le ditte produttrici di emulsioni fotografiche, diede luogo a miglioramenti essenziali nei prodotti per questi impieghi particolari (emulsioni di grande spessore e sensibili a particelle veloci, sino al minimo di ionizzazione specifica), mentre il gruppo stesso perfezionava i metodi di sviluppo e di osservazione microscopica.



Fig. 1 La capanna alla Marmolada per lo studio dei raggi cosmici (1950).  
Crediti: Museo di Storia della Fisica e Dipartimento di Fisica e Astronomia  
"G. Galilei", Università di Padova.

Come conseguenza del collegamento, a Padova si iniziò subito una serie di esposizioni di lastre fotografiche sul Monte Rosa (4550 m s. m.), per studiare la produzione dei mesoni e i processi di disintegrazione nucleare dovuti ai raggi cosmici a quella quota in materiali diversi. D'altra parte, con la tecnica dei contatori si procedeva ad esperienze via via più elaborate, a Padova e in caverne di centrali elettriche, sotto centinaia di metri di roccia. Infine si costruì una camera di Wilson da usare con un grosso elettromagnete in dotazione all'Istituto di Fisica.

Questo magnete venne poi trasportato (1950) in una capanna laboratorio, costruita e messa a nostra disposizione al Piano Fedaia (2000 m s. m.) sulle pendici della Marmolada (fig. 1) dalla società elettrica SADE che stava costruendo una diga in quel luogo.

Con lo stesso elettromagnete, era stata, negli anni precedenti, avviata una serie di ricerche sulla radioattività del potassio 40, che si condusse con la determinazione completa dello schema di disintegrazione di questo nuclide. Altre esperienze erano state compiute, sempre con questo magnete, sui raggi cosmici, dirette a determinare l'eccesso positivo della componente penetrante in diverse bande d'energia, esperienze che vennero riprese alla Marmolada.

È qui il caso di ricordare l'opera appassionata di Italo Filosofo, che collaborò al progetto della capanna e ne curò l'attrezzatura. Vi avviò la misura dell'eccesso positivo con l'elettromagnete, alla quale aveva già partecipato a Padova. Rimasto solo ad attendere alle misure nel periodo natalizio, ebbe un'avventura drammatica: la linea elettrica

destinata ad alimentare il cantiere di costruzione della diga (naturalmente chiuso nell'inverno) e il laboratorio fu abbattuta una notte da una valanga, durante una bufera di neve. Fu così interrotta non solo l'esperienza, ma anche l'illuminazione e il riscaldamento del laboratorio. Filosofo, esperto e collaudato alpinista, non si perse d'animo. Provvide anzitutto a scaricare l'acqua dai vari impianti ad evitarne la rottura per congelamento. Si avventurò quindi fuori della capanna, ormai quasi sepolta dalla neve, nella bufera notturna, per raggiungere il rifugio albergo del CAI, distante forse un quarto d'ora in condizioni normali, dove i fisici usavano prendere i pasti e pernottare, a parte chi, a turno, restava a guardia delle esperienze. Naturalmente queste non poterono riprendere che verso l'estate, quando il cantiere riprese i lavori, riattivando la linea elettrica.

Aggiungerò qualche notizia sulle comunicazioni fra l'Istituto e il Laboratorio della Marmolada, che si conclude con una storia divertente. Ci servivamo di una coppia di stazioni ricetrasmittenti a onde corte, recuperate nei campi ARAR. Il sistema funzionò senza inconvenienti per forse un paio d'anni, quando ricevetti la visita, in Istituto, di due ispettori delle Telecomunicazioni inviati da Roma, i quali presero a interrogarmi, con aria severa. Avevano portato con sé un paio di volumi, che contenevano, diligentemente registrati, i dialoghi che si erano svolti tra Padova e la Marmolada, dialoghi che per loro avevano l'aria di comunicazioni in codice, inforati di nomi e nomignoli, sino a designazioni sibilline come "el paròn" e "el paròn grosso de Venessia".

Ma, a parte il sospetto di chissà quali recondite macchinazioni, che non doveva essere difficile fugare, rimaneva una chiara violazione della legge sulle radiocomunicazioni, per trasmissioni non autorizzate. Violazione della quale ero io il responsabile, come direttore dell'Istituto, e che prevedeva pene severe, a quanto mi si fece capire, perché sembrava configurarsi come un reato e non come semplice illecito amministrativo. Confesso che non mi sentivo a mio agio e cercai di divagare, chiedendo come si potesse regolarizzare la posizione in modo da poter continuare a trasmettere, come era indispensabile per il procedere delle esperienze e per il loro interesse scientifico.

Ad un tratto mi venne in mente che ad ogni Natale, ricevevo e ricambiavo gli auguri di un altissimo funzionario delle Telecomunicazioni, che tale era diventato dopo essersi laureato in fisica insieme con me nel lontano 1925. Chiesi allora ai due severi investigatori se per caso questo funzionario avesse competenza nella materia in contestazione. In breve. non si parlò più di sanzioni e ci si lasciò con un loro impegno a procurare l'autorizzazione alle trasmissioni, esente da ogni tassa. Come infatti avvenne.

Con due decreti del Presidente del CNR, Gustavo Colonnetti (1951 e 1952), venne istituito l'INFN, con le sezioni di Roma, Padova, Milano e Torino, e le prime due assorbivano i Centri di studio di Fisica Nucleare e degli Ioni Veloci, attivi rispettivamente dal 1944 e dal 1947. Si chiudeva così, in particolare, un quinquennio di attività del Centro Ioni Veloci. Esso aveva portato l'Istituto padovano ad un livello più che soddisfacente di operosità. I giovani rientrati dalle varie vicende di guerra, privi di qualsiasi esperienza, si erano ormai bene impadroniti dei rispettivi problemi e delle tecniche sperimentali o di calcolo teorico connesse. Il numero dei giovani impegnati nella ricerca era di molto aumentato per apporto sia di allievi locali, sia di laureati di altre sedi, attratti dall'atmosfera di vivace attività e di cordiale collaborazione che si andava manifestando a Padova. Un sommario bilancio dello sviluppo nel quinquennio è contenuto nella relazione annuale del Centro per il 1951 (*Ricerca Scientifica*, 22 (1952) 911). Non pochi fra i lavori pubblicati rappresentavano dei contributi apprezzabili al progresso delle conoscenze nei rispettivi campi. Del resto, a Padova le discussioni sui vari problemi concernenti la fisica dei raggi cosmici, e quella che si cominciava a chiamare fisica delle particelle fondamentali, erano diventate vivaci e aggiornate, stimolate pure dai contatti frequenti con altri Istituti italiani e stranieri.

Una menzione particolare spetta ad un lavoro di G. Puppi (*Nuovo Cimento*, 5 (1948) 587; 6 (1949) 194), nel quale si confrontano i processi di cattura nucleare del leptone  $\mu^-$  legato in orbita  $K$ , di decadimento spontaneo del  $\mu^\pm$  a riposo, e infine quello di decadimento  $\beta$  dei nuclei radioattivi,

nel quadro della teoria proposta da Fermi per quest'ultimo processo. I rispettivi valori delle costanti d'interazione risultano dello stesso ordine di grandezza. L'Autore è indotto da questa constatazione a immaginare un tipo comune di interazione per i tre processi: è il primo passo verso l'idea della universalità dell'interazione debole. Puppi si era laureato a Padova allo scoppio della guerra, e vi era ritornato come incaricato di Fisica superiore nel 1947-48.

La possibilità di lavoro e semplicemente di sopravvivenza di tanti giovani era stata assicurata in quegli anni con criteri che oggi non sarebbero considerati ortodossi. I posti ufficialmente retribuiti erano pochi. Chi aveva la fortuna di appartenere ad una famiglia benestante e residente a Padova non aveva problemi e svolgeva la sua attività a titolo "onorario". Per gli altri, ad evitare le spese di alloggio, si erano collocati dei letti in locali dell'Istituto; per il vitto si era organizzata una mensa di tipo famigliare, con una cuoca che provvedeva a tutte le occorrenze ripartendo le spese tra gli interessati.

Le retribuzioni (se tali si potevano chiamare) che l'Istituto era in grado di corrispondere, bastanti appena a coprire quelle spese, venivano ricavate da elargizioni di benemeriti enti industriali. Del resto, situazioni individuali così precarie non duravano in genere troppo a lungo, perché a poco a poco qualche nuovo posto "ufficiale" si riusciva ad ottenere. E poi tutto questo fu possibile nell'atmosfera di entusiasmo e di fiducia nella ripresa, che dominò per alcuni anni dopo i duri tempi della guerra.

Un problema che si ebbe presente fin dall'inizio fu quello di un'officina meccanica commisurata a future importanti attività sperimentali. Vi erano le macchine essenziali, ma due soli meccanici: il più anziano di essi era molto esperto e capace di istruirne altri. Assumendo degli apprendisti si poneva però il problema di poterli trattenere con un compenso adeguato dopo anni di addestramento. Il problema fu risolto temporaneamente eseguendo lavori a pagamento per conto di terzi, che in genere erano altri istituti universitari. Così quando l'INFN mise a disposizione maggiori mezzi anche per retribuire persone, non vi fu che da scegliere fra i giovani che avevano rivelato le migliori attitudini. Nel giro di pochi anni la Sezione poté così disporre di un'officina meccanica adeguata ad ogni necessità.

Le osservazioni degli ultimi anni con la camera di Wilson e con le lastre fotografiche nucleari, avevano rivelato l'esistenza di particelle instabili, che, per certe singolarità del loro comportamento, vennero in seguito chiamate "strane". Lo studio ne era reso problematico dalla rarità di tali eventi. C. F. Powell ebbe l'idea che una collaborazione tra parecchi laboratori avrebbe consentito di affrettarne la soluzione, moltiplicando gli eventi disponibili da analizzare



Fig. 2 Preparazione dei palloni per il lancio di emulsioni nucleari nell'Istituto di Fisica di Padova nel 1953. Da sinistra: A. Rostagni, H. Heitler e M. Merlin. Crediti: Museo di Storia della Fisica e Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei", Università di Padova.

con criteri comuni. Invitò perciò quei laboratori europei che già usavano le emulsioni nucleari per lo studio dei raggi cosmici ad un convegno a Bristol nel Dicembre 1951. In apertura egli osservò argutamente che, a differenza dei convegni scientifici abituali, nei quali si portano le conclusioni di lavori di ricerca, dall'attuale convegno si attendevano invece delle proposte per l'avvio di nuovi campi di ricerca.

Egli proponeva dunque di associarsi per effettuare una serie di esposizioni di lastre fotografiche in alta quota (20–30 km s. m.), per mezzo di palloni, che a Bristol avevano già sperimentato. Le lastre sarebbero poi state ripartite fra i laboratori interessati per l'esame microscopico. Conveniva effettuare le esposizioni a latitudini inferiori, per lo meno a quelle dell'Italia centrale o meridionale. Da Padova proponemmo (eravamo presenti Dallaporta ed io) come possibili sedi di lancio Napoli o Cagliari: da qui, secondo la tecnica collaudata, i palloni avrebbero dovuto salire alla quota prestabilita, galleggiare a quota costante per un certo numero di ore, e infine, al comando di un orologio, liberare il carico di emulsione fotografica, sorretto da un paracadute.

Data la situazione geografica dell'Italia meridionale e della Sardegna, si riteneva preferibile predisporre la caduta in mare del materiale in parola e il recupero con mezzi opportuni, che ci saremmo interessati di procurare. La proposta fu accettata e ad essa aderirono parecchi laboratori europei.

Le Sezioni dell'INFN decisero di partecipare in forza all'impresa, collaborando anche alla fase preparatoria. Si concordò che a Padova si sarebbe costruita una parte dei palloni (fig. 2 e fig. 3), mentre Roma e Milano avrebbero collaborato alla costruzione degli apparecchi di segnalazione della posizione del pallone, e di comando. Si ottenne, d'altra parte, come condizione essenziale, l'appoggio dell'Autorità militare per tutta l'impresa. In pratica i lanci (una trentina) vennero effettuati dall'aeroporto di Elmas (Cagliari) fra i mesi di giugno e luglio del 1952 e 1953. Normalmente il pallone, lanciato alle prime luci dell'alba, si spostava verso Est di alcune decine di km, sotto l'azione del vento, sino all'altezza di 20 km, dove la direzione del vento si invertiva; esso procedeva quindi verso Ovest, alla quota di galleggiamento



Fig. 3 Lancio di palloni nei prati vicino alla Basilica di S. Giustina (1953). Crediti: Museo di Storia della Fisica e Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei", Università di Padova.

prestabilita, fra 25 e 30 km. Appositi segnali radio che esso inviava consentivano di seguirlo nei suoi spostamenti, sino al momento dello sgancio.

Una nave militare (un avviso-scorta o una corvetta), partita la sera prima, procurava di trovarsi in zona, mentre un aereo ricognitore, che cercava di individuare una larga chiazza di fluorescenza diffusa dal carico caduto in mare, e dei segnali radio emessi da quest'ultimo, aiutavano a localizzarlo. Si ebbe, in particolare nel secondo anno, una buona percentuale di recuperi (12 su 17 voli). Inoltre, nel secondo anno, si applicò un perfezionamento sostanziale al materiale esposto: anziché strati di emulsione deposta su vetro (che limitava fortemente la lunghezza delle tracce osservabili) si esposero strati liberi di emulsione (*stripped emulsions*), addossati direttamente l'uno all'altro per uno spessore complessivo di qualche centimetro. Ciò rendeva possibile ottenere delle tracce abbastanza lunghe, condizione essenziale per determinare con qualche precisione le caratteristiche della particella che aveva prodotto la traccia (massa, energia cinetica, vita media di essa e dei suoi derivati).

In un convegno tenuto a Padova nell'aprile 1954 fra i partecipanti alle spedizioni, al quale intervennero pure alcuni studiosi di altri laboratori che avevano ottenuto risultati per altra via sull'insieme delle particelle in questione (in particolare con la camera di Wilson), si prese atto che i progressi delle conoscenze, prodotti da una così vasta collaborazione, erano stati assai notevoli, anche rispetto a quanto si era appreso nell'importante Convegno Internazionale di Bagnères de Bigorre (1953), ma rimanevano tuttavia alcune incertezze fondamentali.

Si giunse così, nei mesi seguenti, ad una proposta, avanzata da M. Merlin e discussa fra Bristol, Milano e Padova, di lanciare un grosso blocco di emulsione (volume complessivo di  $15 \text{ dm}^3$ , dimensioni di più dm per ogni lato: il blocco è ricordato nella letteratura come "G-stack"), così da ottenere un numero elevato di tracce che esaurissero la corsa all'interno del blocco stesso. Il peso (oltre 60 kg la sola emulsione) e il costo di tale blocco ponevano problemi, per cui si decise di effettuare un solo lancio, fidando nella fortuna che effettivamente ci fu favorevole. Il blocco, recuperato in terra, dopo un volo sopra l'alta Italia, con momenti drammatici, venne suddiviso fra vari laboratori ed esplorato molto rapidamente, sotto la spinta di Merlin che dedicò a questa impresa, nelle sue diverse fasi, tutta la sua energia e capacità organizzativa. Ne derivarono importanti contributi al chiarimento ulteriore del complesso panorama delle particelle strane. In particolare, la riduzione degli errori nelle determinazioni di massa portò a ritenere eguali fra loro le masse, di poco inferiori al migliaio di masse elettroniche,

di una presunta serie di particelle che si distinguevano per i modi di decadimento: vale a dire, a supporre che si trattasse di un'unica particella, neutra o con carica, la quale poteva decadere in tanti modi diversi. A ciò si opponevano serie considerazioni teoriche, per cui ne nacque il "dilemma  $\theta$ - $\tau$ ", con riferimento ai simboli attribuiti a due fra le ipotetiche particelle in questione.

Questo avveniva nel 1955, in occasione di un congresso internazionale tenuto a Pisa, nel quale furono presentati i risultati del G-stack, e insieme i primi risultati ottenuti da fisici americani con le particelle prodotte artificialmente, in condizioni ben controllate, al Bevatrone, da poco entrato in funzione a Berkeley. I risultati si trovarono in ottimo accordo fra loro, dando piena soddisfazione alle fatiche della collaborazione europea, ma anche mostrando che con questo finiva l'era dei raggi cosmici come mezzo per lo studio delle particelle fondamentali, almeno alle energie raggiungibili con gli acceleratori, in quanto questi risultarono presto in grado di fornire fasci di quelle particelle delle quali i raggi cosmici erano così avari e casuali produttori. Alla soluzione del dilemma  $\theta$ - $\tau$  si giunse in un paio d'anni, attraverso la scoperta della non conservazione della parità nelle interazioni deboli. Le particelle in questione vennero chiamate mesoni  $K$  (precisamente un doppietto  $K^+ K^-$  con masse uguali a  $965m_e$ , e un doppietto  $K^0 \bar{K}^0$  con masse uguali a  $975m_e$ ). A caratterizzare questi mesoni e la serie di particelle instabili di massa superiore al protone, pure rivelate da queste ricerche, che vennero chiamate *iperoni*, si introdusse il nuovo numero quantico chiamato *stranezza*.

La partecipazione in forze delle Sezioni dell'INFN alla grande collaborazione europea aveva stretto i legami fra di esse, dando un significato concreto a questa istituzione. Per Padova poi era stata una prima occasione per una affermazione significativa sul piano internazionale. Della considerazione raggiunta dalla nostra Sezione, si ebbe conferma nel successo della grande Conferenza Internazionale su "Mesons and recently discovered particles" tenuta fra Padova e Venezia nel settembre 1957, sotto gli auspici della SIF.

Accanto all'intervento in prima linea nelle varie fasi operative richieste per le esposizioni delle emulsioni, dalla fabbricazione dei palloni allo sviluppo delle emulsioni (operazione quest'ultima assai delicata), e alla scoperta e misura accurata di numerosi eventi caratteristici della nuova classe di particelle, i fisici padovani recarono pure contributi importanti all'interpretazione dei fenomeni, ad opera di Dallaporta e della sua scuola. È di Dallaporta l'estensione, proposta nel 1955, della nozione di interazione universale di Fermi a tutti i processi deboli, coinvolgenti non solo leptoni e



Fig. 4 Scoperta degli anti-iperoni. Prima osservazione di una anti-lambda (D. J. Prowse e M. Baldo Ceolin, 1958). Crediti: Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei", Università di Padova.

nucleoni, come sino allora si era ritenuto, ma anche iperoni e mesoni, e in particolare i decadimenti non leptonic di questi.

Questo fondamentale risultato fu ritrovato indipendentemente qualche mese più tardi da Gell-Mann, il quale non esitò a riconoscere la priorità di Dallaporta. Era questa la definitiva estensione dell'idea prospettata da Puppi nel 1948, circa un possibile carattere universale dell'interazione debole di Fermi.

Da Padova, mentre si continuava l'analisi del ricco materiale fornito dal G-stack, si cominciavano ad esporre pacchi di emulsione ai fasci del Bevatrone. E i risultati non tardarono: con un'esposizione mirata a questo scopo, M. Baldo Ceolin scoperse con D. J. Prowse, nel 1958, l'*anti-iperone*, come primo rappresentante della famiglia delle antiparticelle strane (fig. 4).

Nel campo della fisica nucleare, Clementel e Villi proposero un'interpretazione fenomenologica delle mirabili esperienze di Hofstadter a Stanford sui fattori di forma dei nucleoni: secondo Clementel e Villi queste esperienze rivelavano distribuzioni ben determinate di carica dei due segni all'interno del protone e del neutrone, rispettivamente.

Questa interpretazione venne perfezionata dal punto di vista concettuale in un successivo lavoro di Fubini, Villi e altri (1961).

Intanto, sempre negli anni '50, altri fatti determinanti per lo sviluppo della Fisica in Italia ed in Europa erano intervenuti: 1) la decisione europea, con partecipazione dell'Italia insieme a una decina di altri paesi, di fondare il CERN (Centro Europeo per Ricerche Nucleari), come sede per attrezzature di ricerca avanzata (per es., grandi acceleratori), tali da richiedere un impegno tecnico e finanziario superiore alle possibilità dei singoli Paesi; 2) la decisione dell'INFN di dar vita ad un laboratorio comune (i Laboratori Nazionali di Frascati) con un acceleratore per elettroni, a energia dell'ordine di 1 GeV; 3) la moltiplicazione graduale delle Sezioni dell'INFN, come filiazioni delle Sezioni esistenti, conseguenza e insieme causa dell'estendersi dell'interesse per la ricerca a sempre più numerosi Istituti italiani (così dalla Sezione di Padova ebbero origine quelle di Bologna e Trieste e, più tardi, Bari, da Roma quella di Pisa, e da Milano quella di Genova).

Antonio Rostagni

# WHO DISCOVERED SUPERFLUIDITY?

**SÉBASTIEN BALIBAR**

*Laboratoire Pierre Aigrain, Department of Physics, École Normale Supérieure, Paris, France*

In 1938, quantum physics jumped from the microscopic world of atoms to the macroscopic one of visible matter. At the origin of this breakthrough, Fritz London and Laszlo Tisza who initiated the theory of superfluidity. They were two refugees working temporarily in Paris and their work had been triggered by experiments simultaneously performed by Piotr Kapitza in Moscow and by Jack Allen and his student Don Misener in Cambridge. In 1941, Lev Landau improved Tisza's model. Among these six great scientists, only Landau and Kapitza received the Nobel prize. This article describes their respective contributions. It is also an opportunity to consider how refugees worked in the storm of years 1938-1945.

## 1 Introduction

In December 1937, J. F. Allen and A. D. Misener in Cambridge and simultaneously P. Kapitza in Moscow discovered the superfluidity of liquid helium. In March 1938, F. London proposed that superfluidity was connected to a quantum phenomenon called "Bose-Einstein condensation" (BEC). He was right so that quantum mechanics suddenly appeared as being at play at the macroscopic scale of our visible world, not only at the microscopic scale of the inside of atoms.

This major discovery was made possible by the progress of low-temperature techniques, especially the construction of helium liquefiers. London's ideas were soon developed by L. Tisza who invented the "two-fluid model" to explain most of the helium properties that were known at that

time. In 1941, L. D. Landau made further progress in the understanding of superfluidity but, surprisingly, he never agreed with London and Tisza on the possible relation of superfluidity to BEC. Among these six great physicists, only Landau and Kapitza received the Nobel Prize.

The history of this discovery is quite interesting because it illustrates the way how modern science progresses, especially how controversies are solved, also because this discovery was made at a time when the world was torn apart by conflicts and wars. Seventy years later, superfluidity has been found in several other quantum fluids. It appears as closely related to superconductivity, another macroscopic property of quantum matter, and superfluid helium can be used to cool down matter at an industrial scale.

## 2 Before the discovery

Superfluidity has a prehistory, which starts with Heike Kamerlingh Onnes liquefying helium gas for the first time in 1908 at the University of Leiden (The Netherlands). In 1932 and at the University of Toronto (Canada), John McLennan observed that, when pumping on liquid helium to cool it down, it stopped boiling below a reproducible temperature of 2.2 K where it suddenly became still as if some inner order had taken place (see [fig. 1](#)). This apparent ordering was confirmed in Leiden in 1935 by Willem Keesom and his daughter Ania, who measured the specific heat of this cold liquid. They found that, below a  $\lambda$ -shape singularity at 2.2 K, the specific heat decreased sharply. This was a strong indication of a phase transition where some kind of order was indeed taking

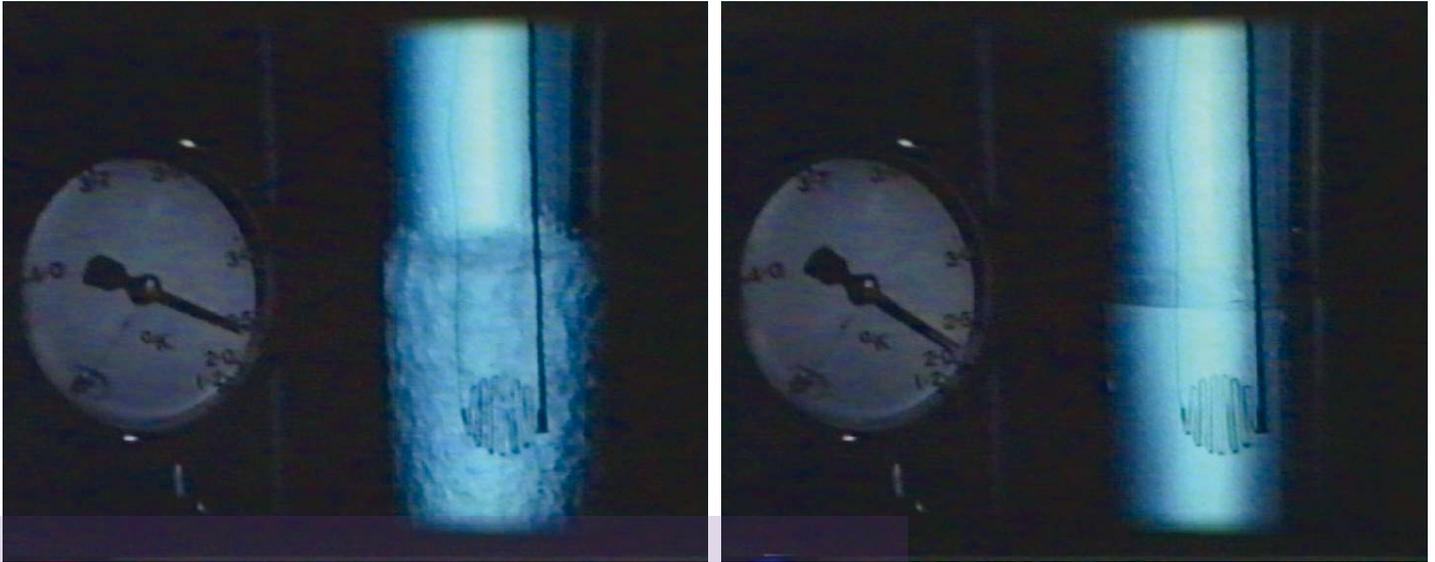


Fig. 1 Two pictures from the historical movie made by J. F. Allen and J. M. G. Armitage in 1972, which show liquid helium boiling at 2.3 K (left) and not at 2.1 K (right) when heated by a resistance. Reproduced with permission from the School of Physics & Astronomy, University of St Andrews. © University of St Andrews.

place. They called this temperature and this phenomenon, respectively, the  $\lambda$ -point and the  $\lambda$ -transition.

In 1935 again, Willem and Ania Keesom also measured the thermal conductivity of liquid helium. They found that, below the “ $\lambda$ -point”, liquid helium conducted heat better than copper, a rather surprising result that was later confirmed at Cambridge University by Jack Allen, Rudolf Peierls and Zaki Uddin. This high thermal conductivity explained why liquid helium was not boiling: the temperature was so homogeneous that liquid helium had no hot spots where gas bubbles could nucleate, it was only evaporating from its free surface<sup>1</sup>.

One possible explanation for this very high thermal conductivity was that it occurred not by classical diffusion but by convection in a liquid whose viscosity could be very small. Obviously, the competition at that time was between Toronto and Leiden, the first two places where helium gas was liquefied. In 1935 once more, but at Toronto this time, J. O. Wilhelm, A. D. Misener and A. R. Clark discovered that the viscosity of liquid helium started decreasing strongly below 2.2 K. For that, they had measured the damping of an oscillating cylinder immersed in liquid helium. The damping was decreasing below the  $\lambda$ -point. With all classical liquids, cooling down increases the viscosity and usually produces

crystallization. Nothing like that was observed with liquid helium: it seemed to be never freezing and its apparent viscosity was decreasing. This is probably what triggered the historical work of Piotr Kapitza in Moscow and that of Jack Allen who had attracted in Cambridge the young student who had made preliminary measurements of this viscosity in Toronto, A. D. Misener.

### 3 The experimental discovery of superfluidity

On January 8th, 1938, the review *Nature* published two letters face to face.

The first one, on page 74 of the issue, was entitled “*Viscosity of Liquid Helium below the  $\lambda$ -point*” and signed “Piotr Kapitza, Institute for Physical Problems, Moscow, Dec. 3” (see fig. 2). Kapitza had observed the flow of liquid helium through a very thin slit between two well-polished disks. Above 2.2 K, liquid helium was not flowing but below this transition temperature the flow was so fast that Kapitza could only propose an upper limit for its viscosity. He suggested that the flow was turbulent and hoped to reduce the upper limit he had found. At the end, Kapitza wrote that “... *by analogy with superconductors, the helium below the  $\lambda$ -point enters a special state which might be called superfluid*”. Kapitza had invented the word “superfluid” and the analogy with superconductors was correct although superconductivity had to wait until the BCS theory of John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer in 1957 to be understood as a superfluidity of electron pairs.

<sup>1</sup> 40 years later, when preparing my doctorate, I discovered that the evaporation of liquid helium was a quantum phenomenon at low temperature, which was analogous to Einstein’s photoelectric effect as had been predicted by P. W. Anderson. See [1].



Fig. 2 On the left: Jack Allen in the Mond laboratory (Cambridge), credits: Cavendish lab. On the right: Piotr Kapitza in front of one of his collaborators in his Institute for Physical Problems (Moscow).

The second letter, on page 75 of the January 8th issue of *Nature*, was entitled “*Flow of liquid helium II*” and signed “J. F. Allen and A. D. Misener, Royal Society Mond Laboratory, Cambridge, Dec. 22” (see fig. 2). It described a series of quantitative measurements of the flow of liquid helium in thin capillaries with inner sizes between 10 and 500 micrometres. Here too, liquid helium was found to flow much faster after cooling it down below the  $\lambda$ -point in a state called “helium II”. Most interestingly, Allen and Misener found that the flow speed was nearly independent of the capillary inner size and of the applied pressure. This behaviour was definitely non-classical. They concluded with: “*it seems therefore that any known formula cannot, from our data, give a value of the ‘viscosity’ which would have much meaning*”.

One has to distinguish between the experimental discovery of superfluidity and the theoretical one.

Concerning the experimental evidence, it is usually dated on January 8th 1938, the publication date. Some people considered that the 19 days difference in the submission date was sufficient to attribute the discovery to Kapitza only. After looking at letter exchanges and notebooks, it became clear that all the authors knew that they were competing with each other but none of them knew the results of the other [2]. These two works were independent: their methods were different and the results too. Furthermore, to work on liquid helium at that time required to start every morning by liquefying helium, so that these experiments lasted for much more than 19 days. In both places they obtained preliminary results during the last months of 1937. When

neglecting the contribution of Allen and Misener and attributing the discovery to Kapitza only, some people may have been influenced by the importance of inventing the word “superfluid”, or by the fact that the Nobel Academy crowned Kapitza alone, or perhaps that, in Cambridge, Allen was using a liquefier that had been built by Kapitza before he was retained in the USSR. However, it seems to me that the first person who demonstrated quantitatively that the hydrodynamics of liquid helium required a non-classical theory was Jack Allen with his student. In 1938, Kapitza was still thinking in terms of a small viscosity. In summary, I attribute the experimental discovery of superfluidity to both Kapitza and Allen. Fortunately, it is generally accepted today.

As for the reasons why Kapitza obtained his Nobel prize in 1978, that is with a long delay, there are rumours saying that Kapitza would have never accepted to share it with his competitors, perhaps because he had suffered so much from being forced to leave his liquefier in Cambridge, where his competitors used it [3].

What happened more precisely to Kapitza?

Kapitza was born in Kronstadt (Russia) in 1894 and, in 1921, he had joined Ernest Rutherford in Cambridge. There he was so successful that the Royal Society had built for him the “Mond Laboratory” with the financial support of Ludwig Mond, the president of ICI, the Imperial Chemical Industries. There he worked on magnetism and built a new type of helium liquefier which started working on April 19th, 1934. But in September 1934 it was the centenary of Mendeleev and an opportunity for Kapitza to go back to USSR and visit

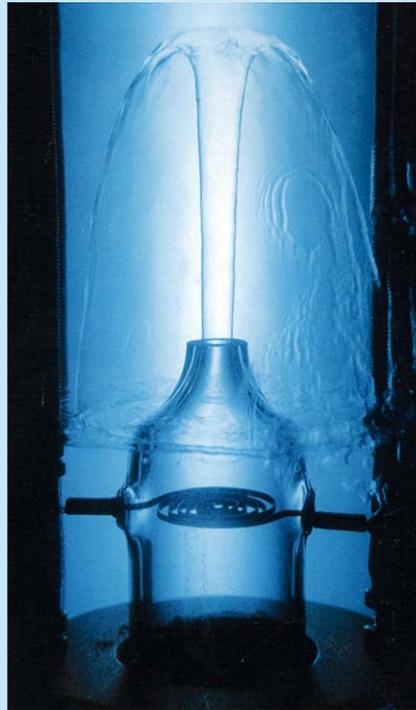


Fig. 3 A photograph of the "fountain effect" taken by J. F. Allen and J. M. G. Armitage in 1972 at St Andrews University (Scotland). Heat is produced by the spiral shape electrical resistance in the middle of the bottle. The bottle is immersed in a superfluid reservoir and closed on its bottom end by a porous plug. Reproduced with permission from the School of Physics & Astronomy, University of St Andrews. © University of St Andrews.

his mother and friends. However he was summoned by the soviet power and retained there. Stalin wanted him to work for the development of USSR. After some temptation of working on the thermodynamics of muscles with Ivan Pavlov, the famous physiologist studying the behaviour of dogs, he asked Stalin to build a new building for his research on helium and to contact Ernest Rutherford to buy his equipment from Cambridge University. Rutherford accepted but kept the precious liquefier in Cambridge so that he could hire new young scientists (Jack Allen and Rudolf Peierls) to work on the newly opened field of liquid helium. Kapitza needed help and he was also allowed to invite two engineers (Henry Pearson and Emil Laurmann) and one of his former students (David Schoenberg of Russian origin). As a result, the "Kapitza Institute" –as the Institute of Physical Problems was soon called in Moscow– was finished building in 1937 and a new helium liquefier ready to produce its first droplets on February 22nd 1937. It took Kapitza less than a year to send his results to *Nature* but he had gone through a very hard period. On April 1935 he had written to his wife: "*I am ready to tear my hair and go berserk. With my instruments, with my ideas, in my laboratory other people live and work, and I do not understand whoever needs this. I want to shout and break chairs. Sometimes I feel my mind is going...*" [4]. He knew that Jack Allen was using his liquefier in Cambridge and he would have strong reasons to be upset if he had to share a Nobel

prize with Jack Allen. Anyhow, I hardly believe that the Nobel committee negotiates its prizes with potential laureates. The reason for nominating Kapitza alone was probably that, after the discovery of January 1938, the contribution of Kapitza was significantly more important than that of Jack Allen, and, in 1978, they had an opportunity to add only one name to those of Penzias and Wilson who had discovered another low temperature: the 2.7 K of the cosmic background radiation. Still, I repeat that the two main authors of the experimental discovery of superfluidity are Jack Allen and Piotr Kapitza.

#### 4 London and the theory of superfluidity

What about the theoretical discovery? It was triggered by one more experiment by Jack Allen, this time with Harry Jones, a theorist of metal properties. They had discovered another surprising property of liquid helium, which they had published in *Nature* on February 5th 1938, only one month after the studies of liquid-helium flow. They plunged a bottle in a liquid-helium reservoir. This bottle was open on its top side but connected to the reservoir on its bottom side thanks to a thin capillary (see fig. 3 where Jack Allen later replaced the capillary by a porous plug). They discovered that heating the inside with an electrical resistance produced a fountain of superfluid helium springing out from the top side.

Once more, no classical theory could explain such an



Fig. 4 Berlin 1928 : Erwin Schrödinger on the left and Fritz London on the right (personal collection of Laszlo Tisza).

astonishing behaviour. Superfluid helium was definitely non-classical and Fritz London searched for a completely new explanation.

Fritz London had arrived in Paris with his wife Edith Caspary in September 1936. They had escaped from Germany as many academics with a Jewish origin, in 1933 when Hitler took power. London had been attracted to Oxford by an astonishing character, Frederik Lindemann who wanted to create there a strong activity on the newly born Low Temperature Physics. Frederik Lindemann was the second son of an Alsatian engineer. After studying in Berlin, he became an engineer in aeronautics, and despite his German name and German accent he was a British citizen. He had become famous as a pilot during World War I but, in the thirties, he was the director of the Clarendon Laboratory in Oxford. As such, at the beginning of 1933, he decided to recruit well-recognized physicists in Berlin and in Breslau. Among them were Erwin Schrödinger, Franz Simon, Kurt Mendelssohn<sup>2</sup>, Nicholas Kürti, Heinz London and his brother Fritz London. Lindemann was also xenophobic, vegetarian, non-smoking and drinking tea. This was all the contrary of Winston Churchill but in 1939 he became Churchill's personal adviser, he was ennobled as Lord Cherwell and called "The prof" or

<sup>2</sup> Franz Simon and Kurt Mendelssohn were cousins of the composers Felix and Fanny Mendelssohn.

"Lord Berlin" depending on appreciation [5].

Fritz London had hesitated before accepting Lindemann's offer but he was already very well recognized thanks to his understanding of the hydrogen molecule. Together with Walter Heitler in 1927 (Fritz London was 27 (fig. 4) and Heitler 23 years old!), they had used Schrödinger's equation to calculate the attraction between H atoms and their binding as an H<sub>2</sub> molecule. With this famous work, they had founded quantum chemistry. Lindemann found support from the Imperial Chemical Industries, a fellowship for three years. Finally Fritz London accepted to move to Oxford.

London's life was peaceful in Oxford except that he had not been able to bring his mother with him, so that she was still in danger, facing the antisemitism of the Nazis. But the fellowship from the ICI ended in 1936 and there was apparently nothing else to support him. His British hosts had not anticipated that Nazism could last for a long time. Fritz London had thus to look for another country to take refuge.

He got offers from Paris, Jerusalem and the United States. He then followed the advice of Walter Adams, the secretary of the Academic Assistance Council who had already helped him and who was in close contact with a similar organism in France, the "Comité d'accueil et d'organisation du travail des scientifiques étrangers". This Comité was run by Louis Rapkine, a biologist of Byelorussian origin who was deeply involved in the drastic problem of welcoming foreign

scientists in France. Rapkine had obtained support from French intellectuals like Jean Perrin (Nobel prize 1926), Paul Langevin, Frédéric and Irène Joliot-Curie (Nobel prizes 1935). Most of them were engaged with the "Front Populaire" the political coalition which had won the 1936 elections and this committee was able to offer immediately a one-year fellowship to Fritz London. Then London obtained a stable position from a new public institution, the CNRS at its very early days.

Soon after reading Allen's new article on the "fountain effect", Fritz London had a revolutionary idea: superfluidity could probably be understood in terms of the "Bose-Einstein condensation" a phenomenon "which had rather got the reputation of having a purely imaginary existence". In 1924, by extending the work of the Bengali theorist Satiendra Nath Bose, Einstein had predicted that a gas of quantum particles should "condense" at low enough temperature on a single quantum state. This very peculiar type of condensation meant that such atoms would become undistinguishable from one another and form a macroscopic wave of matter where their momentum is the same so that they adopt the same behaviour. For this, the atoms had to obey Bose statistics, which requires a certain parity that is different from the other category of quantum particles, namely the Fermi statistics. It is a subtle question of symmetry: Bose particles are even while Fermi particles are odd. Today we understand the Bose-Einstein condensation (BEC) as a new kind of ordering which appears in the momentum space, not in the real space as when atoms crystallize on a periodic network. But at that time, it looked unlikely so that Einstein himself wrote to his friend Paul Ehrenfest the famous question: "*die Theorie ist hübsch aber ob auch etwas wahres dran ist?*" (*the theory is nice but is there anything true in it?*). Ehrenfest had moved to Leiden where Lorentz attracted him to take his own chair when he retired.

Concerning this surprising prediction of a new kind of quantum order, the situation had not evolved very much since 1924. George Uhlenbeck, a student of Ehrenfest, had raised some criticism on Einstein's calculation. But in November 1937, a conference was organized in Amsterdam to celebrate the centenary of van der Waals where Ehrenfest, Uhlenbeck, Kramers and Einstein discussed different types of condensation. Fritz London was also there and at the end of the discussion, Uhlenbeck withdrew his objection. Three months later, when thinking about the superfluidity of liquid helium, London calculated the temperature at which a Bose-Einstein condensation could take place if it were an ideal gas and he found 3.09 K, a value that was not so different from the lambda temperature 2.2 K. Then he calculated the temperature variation of the specific heat and found a singularity that was also similar to what had been measured.

He hesitated but his idea was already spreading in the British community so that he finally sent a short letter, once more to *Nature*. Its title was "*The  $\lambda$ -Phenomenon of Liquid Helium and the Bose-Einstein Degeneracy*" and he signed it "Fritz London, Institut Henri Poincaré, Paris, March 5". He was conscious that reducing a liquid to an ideal gas was a very rough approximation, even if the density of liquid helium was very low as a consequence of large quantum fluctuations. But he wrote: "*it is difficult not to imagine a connexion with the condensation phenomenon of the Bose-Einstein statistics*". A few years before, the two London brothers had already considered that superconductivity could be explained as a macroscopic quantum phenomenon. But the 1938 letter of Fritz London to *Nature* is the real birth of the theory of superfluidity, a very important breakthrough: quantum physics jumped from the microscopic world of atoms to the macroscopic world of visible matter like a litre of liquid helium.

Later on, Fritz London developed his ideas and some other physicists rejected his point of view, especially Lev Landau as we will see further down. But today, there is no doubt that London was careful, modest and perfectly right.

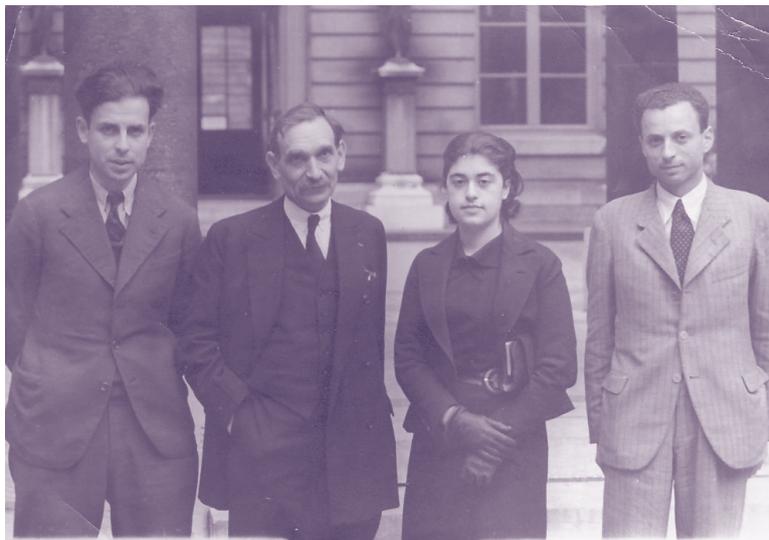


Fig. 5 At the *Collège de France* (Paris) in 1938. From left to right : Michel Magat, Edmond Bauer, Lydia Ochs (a student of the previous two) and Laszlo Tisza (personal collection of Laszlo Tisza).

## 5 Tisza and the two-fluid model

Fritz London was not working alone in Paris. Indeed, he had attracted a Hungarian refugee, Laszlo Tisza. Tisza had also worked on quantum chemistry but a few years later than Heitler and London, when quantum chemistry was developing: with Edward Teller they had built a theory for the methane molecule  $\text{CH}_4$ . Tisza was facing the Hungarian Nazism. After one year in prison because he had a communist friend, he had been introduced by Edward Teller to Lev Landau who was building his famous school in Kharkov. Then, he spent two years with Landau before facing the strengthening of Stalinism in 1937. A few months before Landau was arrested by the NKVD, Beria's ancestor of the KGB, Tisza had to fly away again. Edward Teller and Leo Szilard<sup>3</sup> recommended him to Fritz London who was looking for a close collaborator in Paris. London introduced Tisza to the same group of academics who had helped himself settling in Paris and, in September 1937, Laszlo Tisza arrived at the College de France, in the laboratory of Paul Langevin whose director was Edmond Bauer (fig. 5). The College de France and the Institut Henri Poincaré are close to each other in the centre of Paris so that London and Tisza started a fruitful collaboration on superfluidity.

When London explained to Tisza that the superfluidity of liquid helium could be a macroscopic phenomenon connected to the Bose-Einstein condensation, Tisza was quickly convinced and he tried to develop London's idea. In a

few days only, Tisza had another revolutionary idea. London had mainly considered static properties of superfluid helium and Tisza wanted to understand its strange hydrodynamics. He invented what is now known as the "two-fluid model". When thinking more about the condensation of atoms on a single quantum state, he realized that atoms should condense progressively as the temperature decreases below the  $\lambda$ -transition temperature. It is only at zero temperature that all atoms should group on a single state. At any intermediate temperature, only a fraction of the atoms should be really condensed. From this elementary view on the phenomenon at play, Tisza proposed that, in reality, superfluid helium had to be a kind of homogeneous mixture of two components, not one: a truly "superfluid component" with no viscosity and no entropy, plus a "normal component" made of non-condensed atoms, which was carrying entropy and responsible for dissipation consequently for some kind of viscosity. In the flow experiments by Kapitza and by Allen, the "normal component" should not flow through a very thin slit nor through a narrow capillary because it is viscous; on the contrary, the superfluid component could flow without any viscous resistance. From this assumption, he understood the difference between the early experiments in Toronto and the experiments in Cambridge and Moscow. He then predicted thermomechanical effects: forcing a superfluid to flow through a slit or through a micro-capillary should cool it down. Inversely, heating a superfluid on one side of a bottle that was partially closed on one side by a thin capillary should attract the superfluid component on the heated side of the bottle and increase the pressure there, so that a fountain

<sup>3</sup> Both of these two Hungarian scientists played an important role in the development of the American atomic bomb.

should spring out. He had found a possible explanation of Allen's fountain effect. Soon, he proposed it to Fritz London. But London was very upset.

Tisza's proposal assumed that the components of his "two-fluid model" were able to move independently of each other and this was highly counterintuitive. London considered that Tisza was no longer respecting the necessary rationality of science and decided to stop collaborating with him. Of course, Tisza was deeply perturbed by London's reaction but he kept thinking that his two-fluid model allowed him to understand most of the experimental results. He then arrived at an important prediction: if the two components could move independently, then there should be not only acoustic waves in a superfluid but also "thermal waves" where the two components oscillate in opposite phase from each other. After having sent a short note to *Nature* on April 16th 1938, he wrote a communication in November 1938 for the *Comptes-Rendus* of the French Academy of Sciences, and another one in December. On October 1939, he sent another two articles to the *Journal de Physique*, where he proposed to take the existence of thermal waves in a superfluid as a crucial test of the validity of his model. By adopting this attitude, he was in obvious agreement with the definition of science by Karl Popper. But this test had to wait for several years before being made.

Indeed, the war between France and Germany had started on September 3rd 1939 and the "crucial test" was made in 1946 only. The answer was positive: a superfluid showed thermal waves in addition to sound waves but Tisza was not entirely right. Together with London, Tisza had initiated the theory of superfluidity but the reality was a little more complex as we shall see now.

## 6 London and Tisza escape from France

The war declaration forced London and Tisza to escape again, this time from France to the United States, and it was far from simple nor safe. London was already anxious in 1938 when he realized that antisemitism was growing in France and a war was coming. He thus tried to escape. After considering a possible position in Jerusalem, he accepted an offer from Duke University (North Carolina) where Paul Gross, a friend he had met in Paris, arranged to offer him a position of professor of theoretical chemistry. This invitation allowed him to obtain a visa for himself, his wife and their new born son Frank. Visa were difficult to obtain because the USA were severely restricting immigration. Then London borrowed some money from his brother Heinz and made reservations on the boat *Athenia* which was leaving France to Montreal via Liverpool on September 1st 1939. But, at the last limit, the London family was not accepted on this boat because they had German passports. Fortunately they

found another boat, the *Ile de France* sailing to New York via Southampton, on which they left on September 1st. On that day, the Wehrmacht invaded Poland. On September 3rd at 11 a.m. the United Kingdom declared war to Germany. At 5 p.m. France did the same. At 9 p.m. one of the German submarines destroyed the *Athenia*. It is miraculous that the London family was not on its board.

Tisza was less known and had no such offer for a position in the USA. He was still in France. Already in 1937, when leaving Hungary, he had applied for an American visa but he had not received any answer. In October 1939, together with Michel Magat, a friend chemist of Russian origin who was also in Langevin's laboratory, they entered the French Army in its foreign legion. However, Tisza stayed in his regiment for two months only because they discovered that he had serious heart problems. In a sense, Tisza was very fortunate because in June 1940, his regiment of foreign volunteers was destroyed by the Nazi tanks. However, he had entered the French army to prove his support to the nation that had welcomed him. He thus contributed to a collaboration with the military "Laboratory of Powders". This was perhaps also to protect himself against the anti-Semitic laws which were dangerously growing in France at that time. Jacques Hadamard, a famous mathematician from the *College de France* and his daughter Jacqueline who was working in Langevin's laboratory helped Laszlo Tisza and his wife Vera to escape from Paris just before it was invaded by the Wehrmacht. They succeeded in reaching Toulouse in the south of France but the situation there was not really safe either. Tisza had lost his CNRS position and had no rights to travel. Fortunately, they received their American visas in February 1941 and they succeeded in reaching Lisbon with other visas. After one month waiting for a boat, they left Europe and arrived in the USA at the end of March 1941. There, it was rather difficult to find a position but in September 1941 Laszlo Tisza entered the MIT as an instructor. In 1961 he was full professor at the same MIT. Both London's and Tisza's lives illustrate the difficulties refugees encountered in England and in France despite the help of local colleagues, also the difficulties they had to emigrate to the United States where the immigration was strictly controlled. In this last storm, the work of London and Tisza was interrupted.

## 7 Kapitza and Landau in Moscow

At the same time in USSR, research in Kapitza's Institute for Physical Problems did not stop but scientific life was far from quiet. In February 1937, Lev Landau had been forced to leave Kharkov by the development of Stalinism. He joined Kapitza in Moscow but in April 1938, when London and Tisza published their ideas in *Nature*, Landau wrote a leaflet to be distributed during the May 1st celebration where he



Fig. 6 Landau at the Lubianka prison in 1938 (archives of the KGB).

compared Stalin to Hitler and called people to get rid of him. Of course, this leaflet did not please the NKVD (the ancestor of the KGB) and Landau was immediately sent to the Lubianka prison where people were tortured and executed (fig. 6). Nearly one year later, in March 1939, Landau was hardly surviving there when Kapitza succeeded to liberate him after hard negotiations with Beria and Molotov. On April 6th 1939, in one of his letters to Molotov, head of the USSR government and close collaborator of Stalin, Kapitza justified the necessity of liberating Landau by writing:

*“In my recent studies on liquid helium close to the absolute zero, I have succeeded in discovering a number of new phenomena which promise to shed light on one of the most puzzling areas of contemporary physics... I need theoretical help. In the Soviet Union, it is Landau who has the most perfect command on the theoretical field I need, but unfortunately he has been in custody for a whole year”.*

80 years later it seems difficult to understand how Molotov and Beria could appreciate the importance of superfluidity but, a few days later, Kapitza was summoned to the Lubianka and he obtained the liberation of Landau after engaging his own freedom as a guarantee that Landau would never cause any more trouble.

After returning to the Kapitza Institute, Landau quickly came back to physics and, in 1941, he simultaneously published a Russian version and an American version of an article entitled *“Theory of the superfluidity of Helium II”*. In this famous pair of articles, he proposed a theory of quantum liquids in which he derived a “two-fluid model” after severely criticizing the work of Tisza. There was no mention of Bose-Einstein condensation and he did not even mention London.

Landau’s work was obviously more rigorous than Tisza’s very short letter to *Nature*. But he ignored the other articles Tisza had written before leaving France. He had a different definition of the “normal component” introduced by Tisza: instead of being made of non-condensed atoms, he understood that it had to be made of collective excitations of the whole fluid. As a consequence, he also predicted the existence of thermal waves which he called “second sound”, but without citing the prediction by Tisza three years before.

## 8 After the war

In July 1946, a large conference was organized in Cambridge on Low Temperature Physics. Both London and Landau were invited but Landau had no permission to leave USSR.

The opening talk was given by London with the title “*The present state of the theory of liquid helium*”. A few months before, the Russian physicist Vassili Peshkov had discovered in the Kapitza Institute the existence of the thermal waves or “second sound” that had been predicted by Tisza and by Landau. London was finally convinced that Tisza’s intuition was right. But he was far from convinced by Landau’s approach, which he considered as “*based on the shaky grounds of imaginary rotons*”. These rotons were a particular kind of collective excitations that Landau had indeed not introduced rigorously. Peshkov’s results did not extend to very low temperature so that they looked in better agreement with Tisza’s prediction than with Landau’s one. As a consequence, London and Tisza had recovered their mutual understanding and support but the situation was not yet clear.

A few months later, Peshkov published new results in clear agreement with Landau’s prediction. Landau increased his criticism of Tisza’s. He also apologized for having missed Tisza’s letters to the *Compte-Rendus*, but this is hard to believe since his very close collaborator Kapitza cited them at the same time.

As for the connection to the Bose-Einstein condensation, a more fundamental question, London and Tisza proposed to test its validity by studying the light isotope helium 3 instead of helium 4 which had been studied up to that time. Here again, I think of Karl Popper. Helium 3 is a product of the decay of tritium which was becoming progressively

available. Helium 3 atoms obey Fermi statistics while helium 4 atoms obey Bose statistics. Landau had developed his theory as if there were no difference between Bose and Fermi liquids. But the Bose-Einstein condensation is a property of Bose particles only, so that London and Tisza predicted that liquid helium 3 should not be superfluid. The test was made in 1949 by Osborne, Weinstock and Abraham and, this time, it proved that London and Tisza were right. As Lev Pitaevskii wrote in 1992, “*Landau was only one step from the very interesting subject of macroscopic quantum phenomena. But he never made this step. And there is no sense now to guess why...*” [6]. In 1973, Doug Osheroff, David Lee and Bob Richardson demonstrated that helium 3 has to form pairs to be superfluid, just like electrons in superconductors, and that it happens at a temperature thousand times lower than in helium 4.

In summary, London, Tisza and Landau had all found part of the truth but none of their original articles were entirely correct. As for the theoretical discovery of superfluidity, it would be unfair to attribute it to Landau only.

The whole story of the discovery of superfluidity illustrates that it is always difficult to identify the authors of a discovery at a time when science is becoming global at the scale of the whole world. This particular discovery also illustrates how scientists work sometimes. In the decade 1937-1947, they made fundamental breakthroughs in rather hard life conditions, as if some instability could be favourable to scientific creation.

## References

- [1] S. Balibar *et al.*, *Phys. Rev. B*, 18 (1978) 3096, and the review by S. Balibar, *J. Low Temp. Phys.*, 185 (2016) 209, on “quantum evaporation”.
- [2] A. Griffin, “*Superfluidity: three people, two papers, one prize*”, *Phys. World*, August 2008, p. 27.
- [3] S. Balibar, “*The Discovery of Superfluidity*”, *J. Low Temp. Phys.*, 146 (2007) 441; S. Balibar, *Un savant dans la tourmente*, to appear in October 2018.
- [4] P. E. Rubinin, “*The discovery of superfluidity. Letters and documents*”, *Phys. Usp.*, 40 (1997) 1249.
- [5] See for example: The Earl of Birkenhead “*The professor and the Prime Minister: The official life of Professor F.A. Lindemann, viscount Cherwell*” (Houghton Mifflin) 1962.
- [6] L. Pitaevskii, “*50 years of Landau’s theory of superfluidity*”, *J. Low Temp. Phys.*, 87 (1992) 127.

### Sébastien Balibar

Sébastien Balibar is Research Director at the Department of Physics of École Normale Supérieure (Paris), and member of the French Academy of Sciences. He is mainly recognized for his work on liquid and solid helium: quantum evaporation, roughening of crystal surfaces, cavitation, wetting, mechanical properties of quantum solids. For a large readership, he also wrote several books on recent scientific discoveries, the climate change and the daily life of scientists.

## NUCLEAR THRESHOLDS

### ARCHITECTURAL IMPLICATIONS OF ENRICO FERMI'S CHICAGO PILE-1

ZOË PRILLINGER, LUKE OGRYDZIAK

Ogrydziak Prillinger Architects (OPA), San Francisco, CA, USA

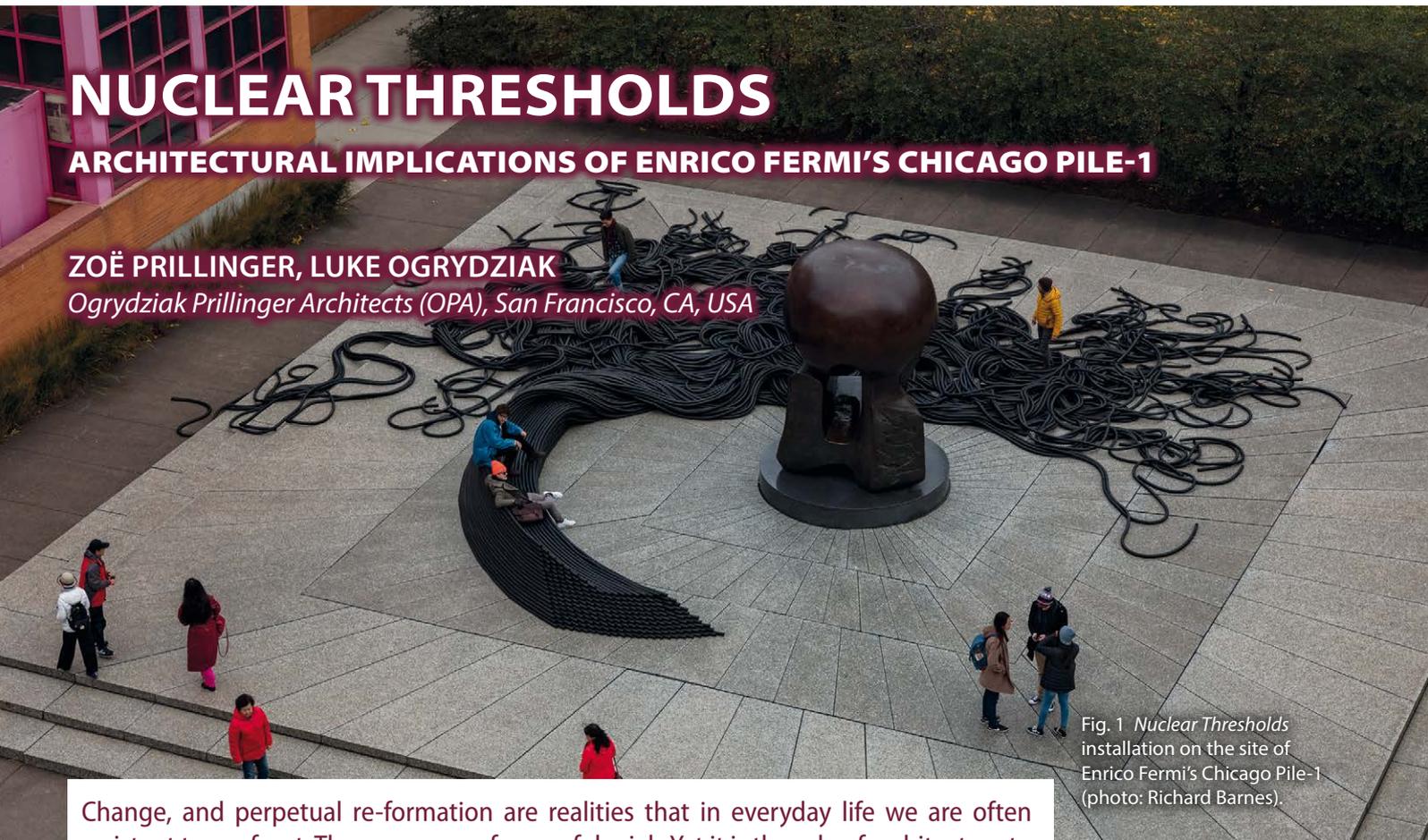


Fig. 1 *Nuclear Thresholds* installation on the site of Enrico Fermi's Chicago Pile-1 (photo: Richard Barnes).

Change, and perpetual re-formation are realities that in everyday life we are often resistant to confront. There are many forms of denial. Yet it is the role of architecture to represent and reflect our worldview and perceptions of reality. With this in mind, over the past few years our office has been exploring different aspects of complexity and contingency and how they relate to architectural form. A recent invitation to consider the architectural implications of Enrico Fermi's self-sustaining chain reaction seemed like an ideal opportunity to address these issues.

We were asked last winter to think about making a commemorative installation for 75th anniversary of Fermi's "Chicago Pile-1", to be entitled *Nuclear Thresholds* (fig. 1). The project brief invited us to reflect on the nature of Fermi's experiment, as well as the tension between control and the loss of control engendered by the birth of the Nuclear Age. In developing the project, we thought about chain reactions, and the random walks of liberated neutrons. We thought about critical mass, when a chain reaction is barely self-sustaining – such as was the case with Fermi's experiment, and supercriticality, the turning point when the rate of fission increases, sometimes to the point of being out of control. We were interested in the complex materiality embodied in the original experiment: the tightly-packed pile of graphite used for the experiment, as well as thinking about matter as something not solid but composed largely of space and energetic particles.

The project was very open-ended, functionally speaking. We knew the installation would share space on an existing plinth dominated by a large bronze sculpture by Henry Moore. Moore's "Atom Piece" was installed to mark the commemoration of the 25th anniversary of Fermi's experiment. We were asked to consider how the installation might enhance the viewing Moore's sculpture at the same time that it reflected on the original physics achievement.

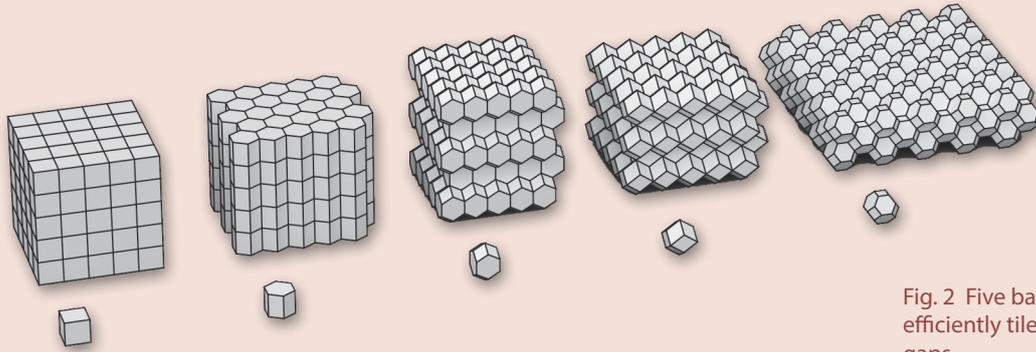


Fig. 2 Five basic prisms that efficiently tile space without any gaps.

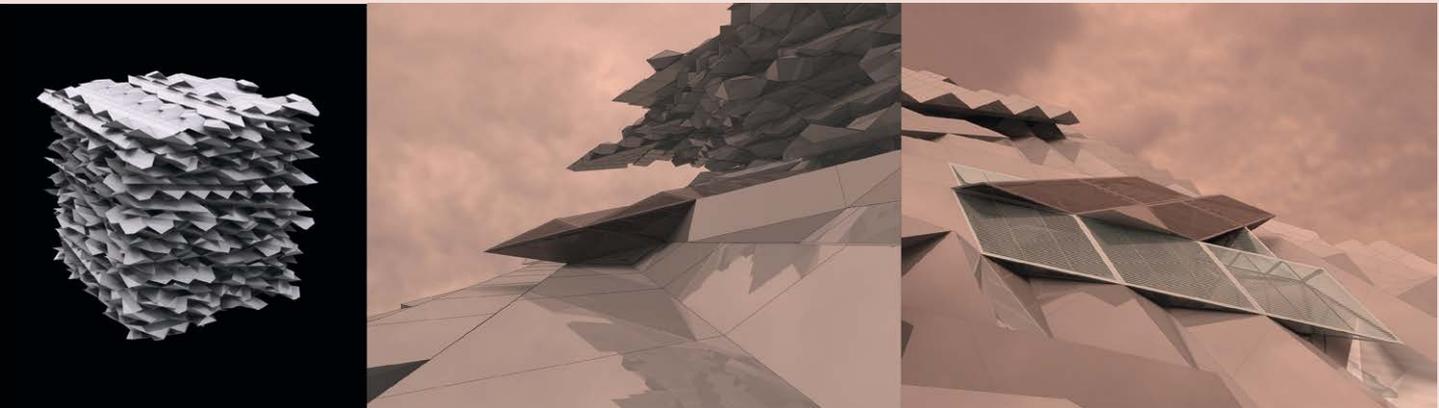


Fig. 3 The Conway biprism is a convex polyhedron which fills space perfectly, but aperiodically. The Conway House emerges from the chain of geometric relationships that this tiling system prescribes.

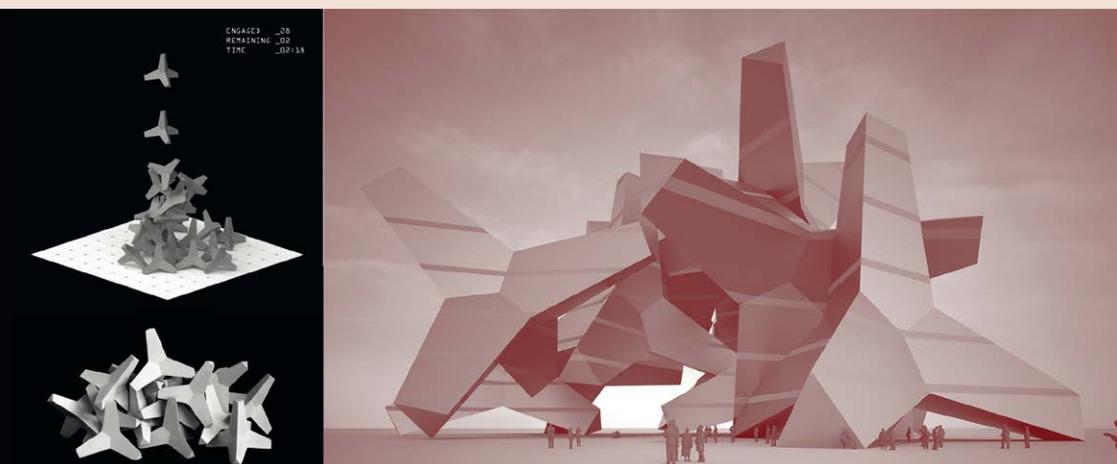


Fig. 4 Digital and physical simulations of the stochastic aggregation of tetrahedral structures. *Tetrastars* proposes using this model of irregularly interlocking forms for a corporate headquarters.

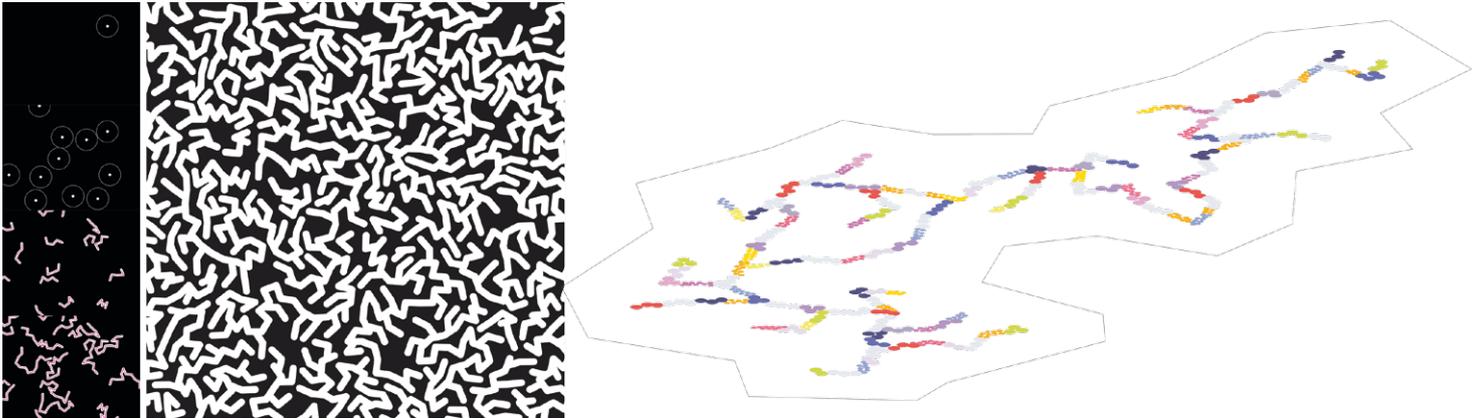


Fig. 5 A time-based “gopher” agents fill space with branching burrows using buffered collision detection. Planting diagram based on a branching burrow using select native annual and perennial flowering plants.

## 1 Genealogy of ideas

To describe the evolution of our proposal, and create a broader context for the architectural issues involved, it is helpful to situate it within earlier research and built work that is fundamental to some of the basic ideas. A critical theme is the idea of control, and loss of control. Architects typically like to be in control, in fact, that is one of the ways one typically judges the success of a project: did what the architect want to happen happen? The more control one can exert to manifest one’s vision, the better architect one is. In architecture, this can mean the control and management of space, the control of form, the control of behavior, and the control of experience. Architects tend to be real control freaks. It can be especially difficult for this kind of individual to come to terms with a loss of control! All the more reason for architecture to come to terms with this trauma.

When we talk about the control and the organization of space, it is impossible not to think of the grid,

efficiency, and close-packing. The ideal in all these highly rational approaches is no wasted space. If you think about close-packing, there are some basic geometric alternatives to the grid that can efficiently tile space without any gaps (fig. 2). The stacking of basic prisms is highly ordered and very repetitive.

But our office is excited about some level of unpredictability. So, some years ago, when we were doing a project based on close-packing, we learned about the Conway biprism (fig. 3). This is another prism which tiles space perfectly (with no gaps). But in this case the resulting layers are rotated a non-repetitive angle relative to all the other layers, giving us a system spawned by a single object that extends to infinity without repetition. We conceptualized a world governed by this system, and within it designed *Conway House*.

Just as we were excited by the irrationality of the tiling of Conway biprism, we started to look for other ways to free ourselves from the confines of perfect efficiency. We started to

explore inefficient packing. *Tetrastars* (fig. 4) again starts with a simple unit that is repeated. But here the overall system is created by stochastic aggregation rather than a geometric rule. The order is statistical and time-based rather than purely geometric.

Far along the spectrum of unusual assignments, we were asked to work for a hypothetical gopher client for an art installation in the San Francisco Presidio. In the gopher we found our perfect client because these creatures combine a high degree of spatial efficiency in their tireless digging with a solitary nature that avoids adjacent gopher burrows. We designed a Processing program that propagated multiple gopher agents who incrementally filled space with their branching burrows using buffered collision detection. *Burrows* (fig. 5) combines a high degree of density with stochastic development. We used the branching plans for a planting arrangement of the native forbs and grasses that gophers prefer to eat (as they burrow in underground safety).

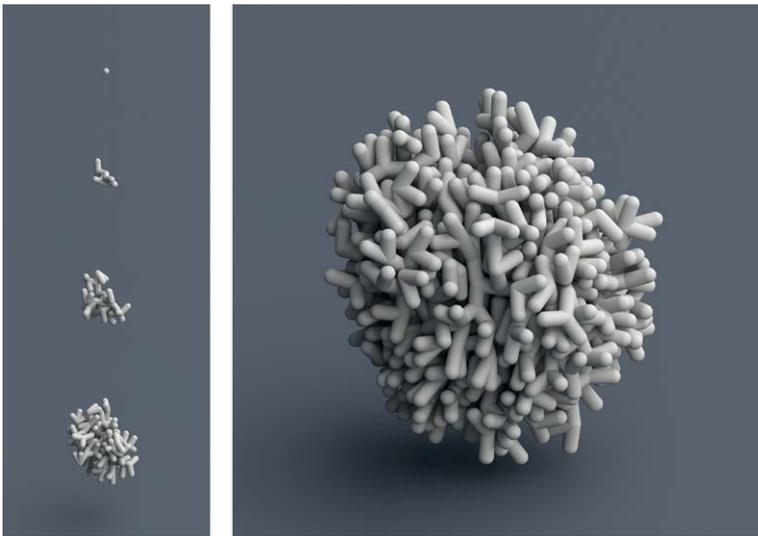


Fig. 6 *Branch* explores three-dimensional stochastic branching using a diffusion-limited aggregation (DLA) growth model.

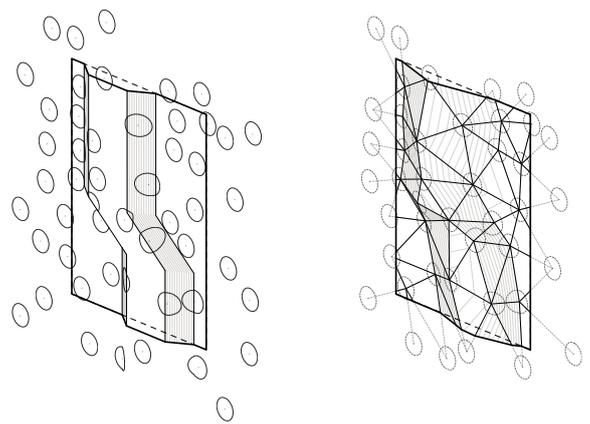


Fig. 7 Volumetric organic lattice at the Gallery House façade (photo: Tim Griffith).

In *Branch* (fig. 6), we explored the same issues volumetrically. *Branch* begins with a seed point that branches outwards in all directions stochastically, again using buffered collision-detection. The result is an aggregation that is pretty tight, but because of some inefficiencies born of randomness, it is also very complex, and to our mind, spatially exciting.

Also time-based, we generated the façade of Gallery House (fig. 7) stochastically, using a simulation that uses self-avoidance to create an organic lattice. The agents were constrained within an envelope determined by

the allowable projection from the building face. In San Francisco, this allowable projection is the reason for the preponderancy of bay windows, but here, combined with the blind stochastic nature of the simulation, it results in a much more organic, undulating volume.

So, you can see with all these strategies exploring stochastics and inefficiency, we are looking for a way to set something in motion that surprises us. Swirling is another strategy that we think is exciting for related reasons. Swirling takes us more deliberately into thinking about the

opportunities that architecture has to create psychological effects in the user. Leonardo da Vinci's 16th century studies of water turbulence demonstrate a Renaissance fascination with complex, dynamic formal systems. Clearly, this is not a new interest! Swirling creates situations that are hard to predict and control. The swirling effect is something we are interested in exploring in our work at all scales of form and surface. We like it because it challenges a dominant organization of space – orthogonal geometries, in the case of architecture.

About ten years ago, in thinking

about swirling, we designed a C++ simulation of a bee's flight path. The looping, relaxed tendrils, and wandering curves of different speeds were intended to be used for the decorative relief of a ceiling that was never enacted. Shortly after, we started looking again at the looseness and freedom in the painter Brice Marden's *Cold Mountain* series. In particular, we liked the tension between the freedom of the curves and the constraint of the edge of the canvas. We analyzed the qualities of the *Cold Mountain* curves

(fig. 8), and created a machine that could enact the same genre of looping.

We adapted this research for another project, but in this case wanted meandering paths to wander three-dimensionally for a set period of time (fig. 9). One of the interesting challenges in *Timeout/Temps Mort*, as in the *Cold Mountain* piece, is the tension between freedom and constraint (fig. 9). In this case, the freedom of the curving paths is constrained by a virtual bounding box and by self-avoidance.

We developed a Knot Machine to

explore similar themes but endowed the agents with a greater variety of behaviors, ranging from straight lines to tight curves (fig. 10). Additionally, the agents could be attracted to points, or sucked into vortices.

Recently we had the opportunity to apply a vortex to a built project (fig. 11). In *Vortex*, we positioned a mini-vortex at the front door. The resulting faceted geometry reacts to the tight winding and relaxes as it flows out in different trajectories.

In a recently completed project called

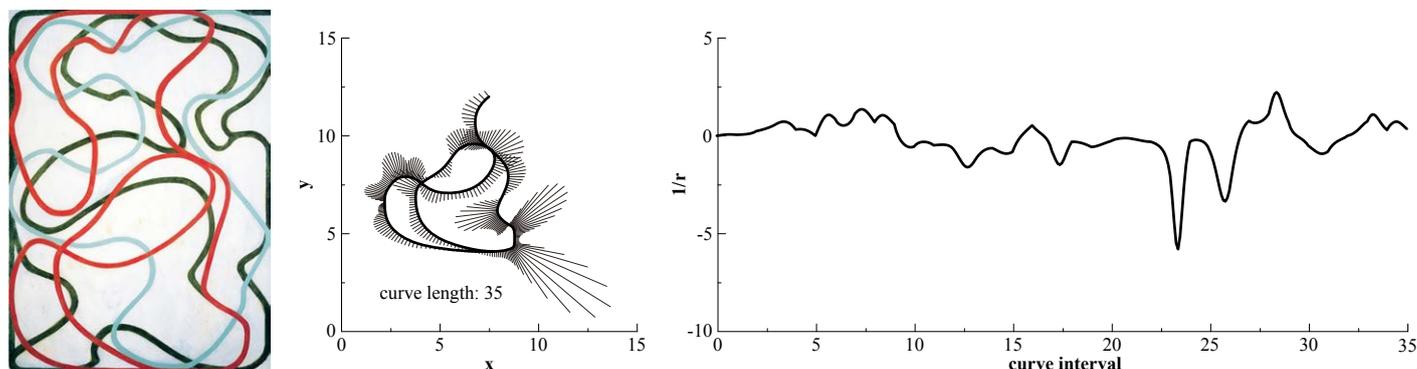


Fig. 8 *Loop* analyzes the calligraphic curves in Brice Marden's *Cold Mountain* paintings in terms of changing linear and centripetal acceleration controls.

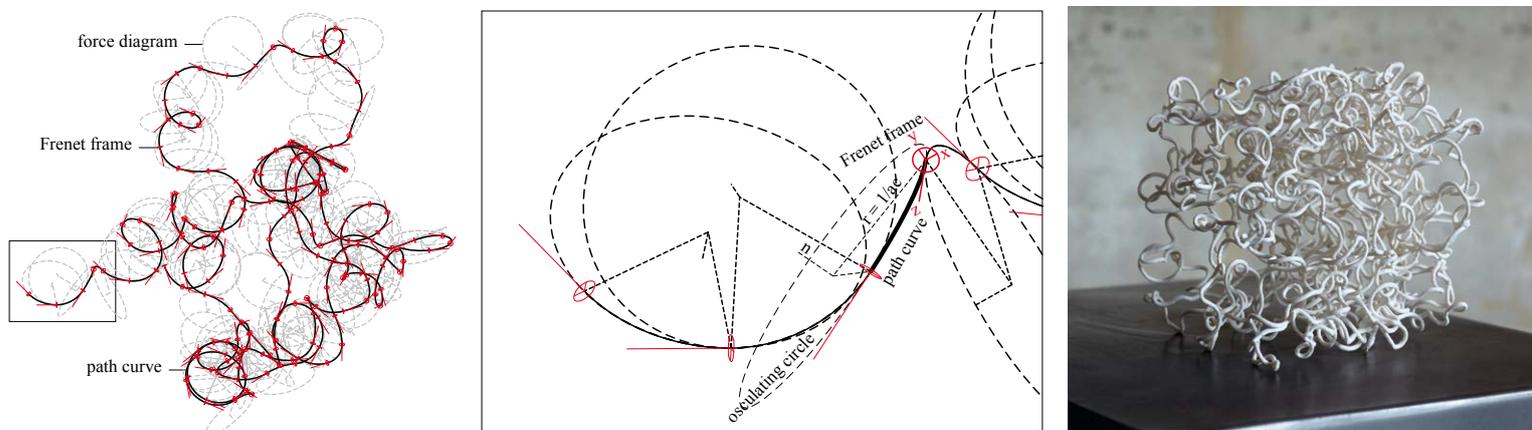


Fig. 9 *Timeout/Temps Mort* uses the *Loop* curve controls to generate a three-dimensional, self-avoiding curving path that wanders within a bounding box for a limited period of time.

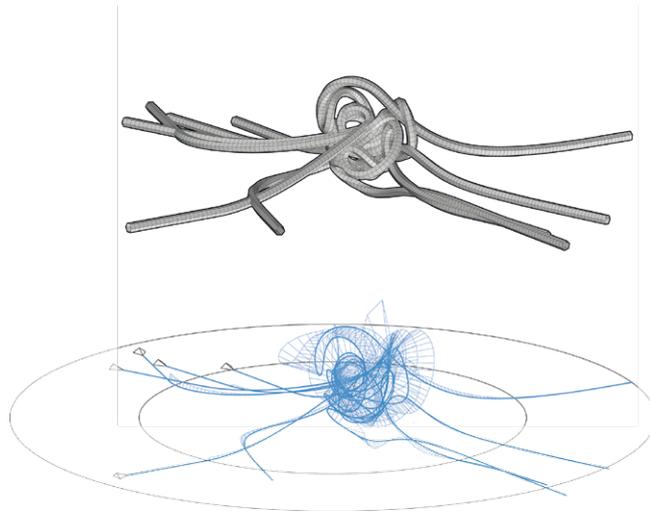


Fig. 10 *Knot Machine* enables agents to create paths with an expanded range of behavior, such as knotting.

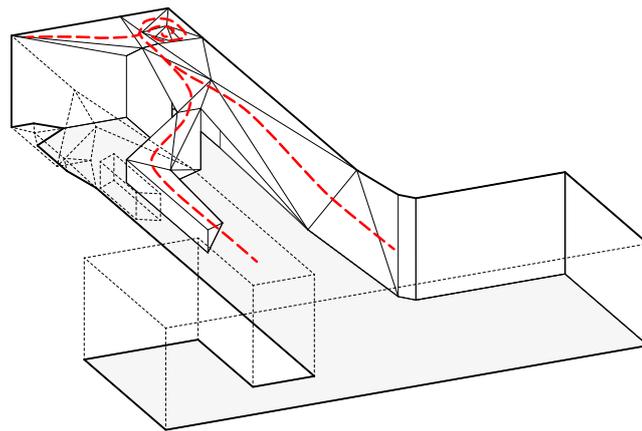


Fig. 11 *Vortex* explores making a fluid interior space that changes sizes from an intimate enfolded chamber to a monumental cavern. At the entry, a vortex overhead pulls the walls into an eddy of space, creating an intimate vestibule. The swirling effect gradually diminishes, eventually easing to single large folds that ultimately dissipate into the existing rectilinear perimeter walls (photo: Hufton + Crowe).

*Shapeshifter*, the swirling happens at a larger scale, informing the development of the overall form and the movement that it implies in both landforms and architecture (fig. 12).

All of these explorations were hovering in the background when we began to think about the Chicago Pile-1 installation. We started by learning about the original experiment –both the site, and the physics involved– and developed some preliminary models. These were not yet specific proposals, but rather specific formal systems related to the issues we were considering.

## 2 Initial approaches

This first model began with the idea of close packing spheres in a time-based diffusion-limited aggregation (DLA) in which the spheres were confined within a hexagonal array (fig. 13). The CP1 experiment took place in a disused squash court under the University of Chicago football stadium, so throughout our research on nuclear processes there was a ghostly presence of squash balls. Indeed, to our literal-minded eyes, there is even an uncanny formal affinity between the perfect circles and spheres of physics diagrams and the humble squash ball. Initially

we wondered if the installation might be made aggregated squash balls. But if you do the math determining how many squash balls it would take to fill a one-meter box, it is quite surprising. Well, perhaps not to a mathematician or a physicist. But we were surprised: we could blow our entire budget on a tightly-packed 1-meter cube. Precisely our surprise made us feel like this could be interesting territory. Could the project start with an area of close packing (of spheres) which then was dispersed with greater porosity and less homogeneity? Ultimately, our final project incorporates elements of this



Fig. 12 The landscape and building forms at *Shapeshifter* are guided by a tightening swirling motion. Both are articulated by regular mesh composed of planar faces. Every edge is entirely shared: no edges terminate in the middle of another edge. This results in a flow of space that supports extreme difference without discontinuities. Elements of the building slide into each other with shifting relationships of fractured symmetries, local axes, and embedded parallelisms (photo: Hufton + Crowe).

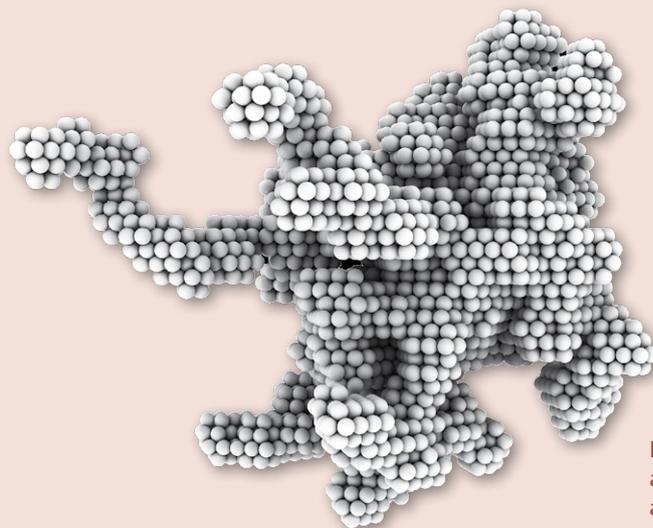


Fig. 13 Close-packed spheres in a timed-based diffusion-limited aggregation (DLA) simulation.

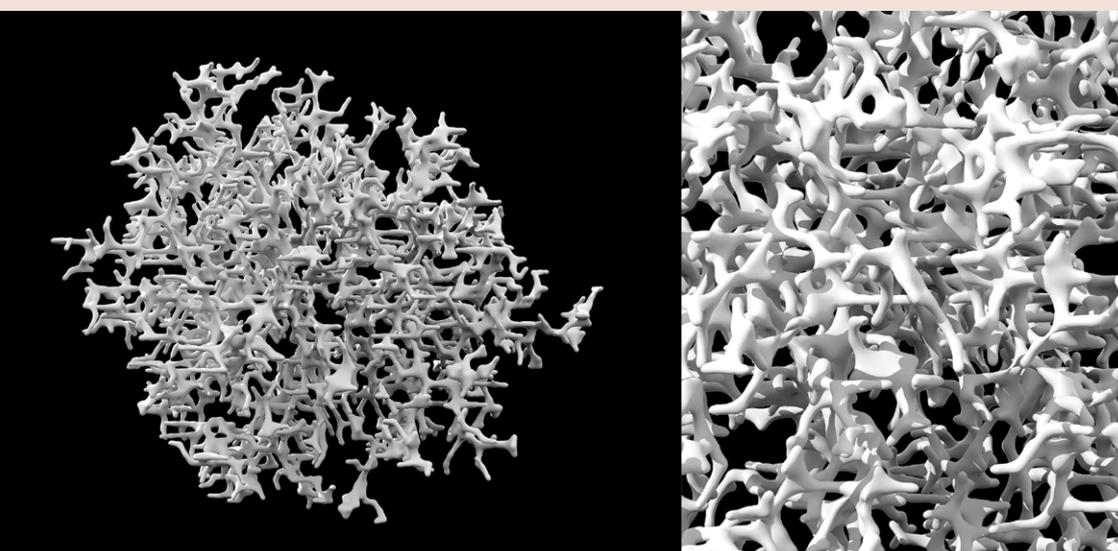


Fig. 14 Another DLA simulation. This approach releases multiple random walking agents at the edge of the model. Whenever an agent hits the aggregation, a hexagonal voxel is added to the cluster. The voxels are glued together, then softened with a mesh-relaxation algorithm to create a more organic morphology.



Fig. 15 An early unconscious design impulse, uncannily prescient.

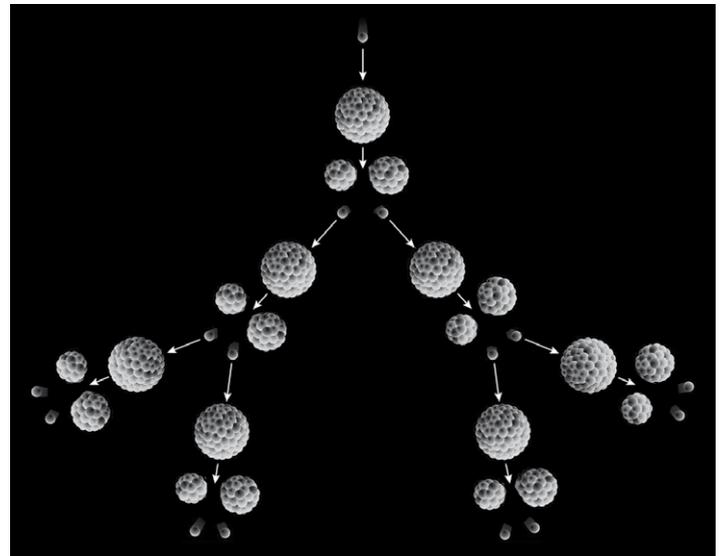


Fig. 16 Exponential growth of a chain reaction.

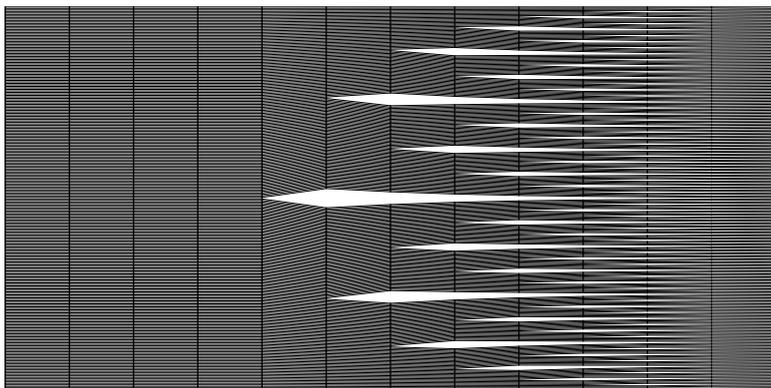


Fig. 17 A bundle of strands recursively splits until all the strands are independent.

first model, albeit in 2 rather than 3 dimensions – much more economical!

In the original CP1 experiment, the particles moved through the graphite blocks of the pile in “random walks”. Diffusion-limited aggregation (DLA) simulates random walks, but instead of solidifying the path of a single agent, we released multiple random walking agents at the edge of the model, and wherever they hit, the model grew (fig. 14). We also translated the resulting hexagonal array into a planar mesh, then “relaxing” it for a more organic

morphology. This approach yielded some interesting spatial complexity, but ultimately felt too uniform and homogenous. We were looking for a system that had a sharper internal break, that was somehow articulate about the existentially pivotal moment of the CP1 experiment and the idea of the criticality threshold. This simulation felt closer because of the sudden exponential growth. But unlike an explosion, our installation would necessarily be a static form. In other words, the development of the system over time would need

to be implied rather than enacted – a common architectural conundrum in the digital age.

Then suddenly in the spring, the project went from a kind of hazy possibility to having a greenlight and a working budget. So we switched gears from more abstract research to specific proposals for the actual site. A sketch from our initial concept discussions (fig. 15), made before we even started the computational research, goes to show that one just cannot fight one’s unconscious.

In our initial design pitch to the University, we presented two possible schemes. The winner involved layering rubber tubes of variable density to create a bench of tightly-packed strands which hits a “threshold” and increases in complexity. The development of the project combined material research, and the creation of both physical and computational models, all of which influenced each other in non-linear ways.

A basic chain reaction diagram helped us visualize our thinking (fig. 16). We felt that focusing on the exponential growth of a chain reaction was a promising way to manifest the complexity. As architects, we also wanted to challenge the model of solidity that we all rather stupidly work with, with an updated model that considers matter on a subatomic scale. Ultimately, this would come to mean contrasting a coherent, organized “solid form” with a breakdown into atomized independent parts.

The diagram shown in fig. 17 illustrates in what would ultimately become the model for our project: one

unified group splits recursively until the constituent parts are all independent.

### 3 The realities of construction

The original CP1 experiment was conducted using a tightly-packed pile of graphite blocks. For our installation, we incorporated a similar strategy of highly efficient piling for the region of greatest density. A drawing of the tightly-packed part of the installation, the bench, illustrates the stacking of 241 x 2” diameter cords. The cords are arranged in a hexagonal grid which is the 2-dimensional equivalent of our early 3-dimensional hex-grid study models. It is as if the original squash balls studies were extruded into strands. Rather than just cutting a vertical section, the bench arc begins with a single strand (fig. 18). We were trying to emphasize the process of piling, and also how the apparently solid form is composed of individual strands with their own autonomy. We found it interesting how following an extremely simple rule for piling (based on uniform offset) created a complex sheared and

curved form simply because of the embedded complexity of combining concentric curves and the hex-grid section. The specific result emerges from a process enacted strand by strand rather than a classical top-down approach.

Because of the complexity of the model, conventional strategies of representation simply fell apart. Most architecture remains based on boxes. Walls, floor, and roofs are all rectangular prisms composed of various material laminations. In turn, these rectangular prisms form larger hollow rectangular prisms that can be occupied. The occasional cranked plan or section does little to disturb this model of matter as fundamentally solid. To model a form that gradually disintegrates triggered some new work flows, and also an acceptance of the inevitable gaps which would emerge between the representations and the thing itself. In our first physical study models, we used black licorice and thread for the bundling. The tendency for the licorice to slump provided a pretty good approximation of the character

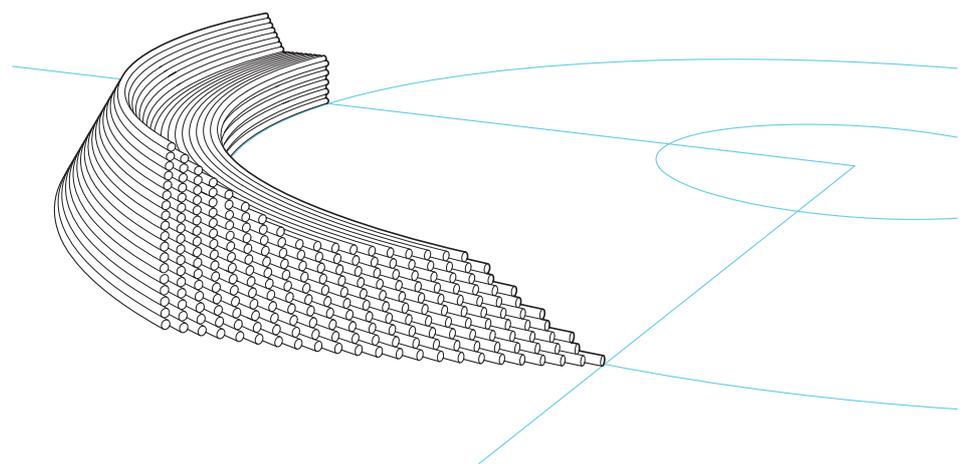


Fig. 18 The bench begins with the gradual accretion of cords into a hex grid. The pile curves along a 90 degree arc until the first bifurcation.

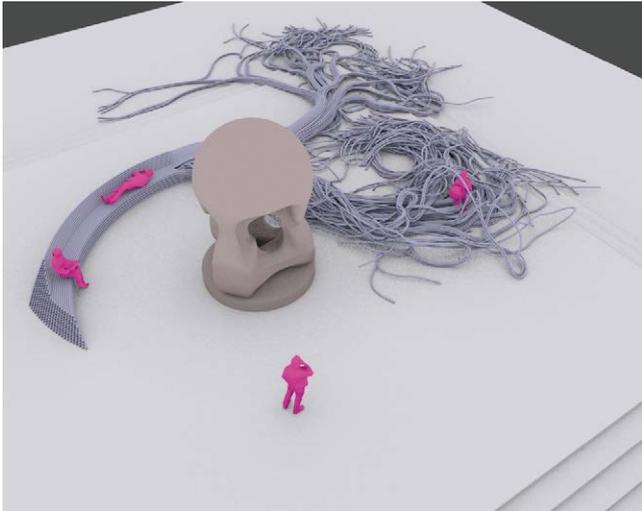


Fig. 19 A physics simulation used to explore variation for the installation using the Bullet engine with Blender.

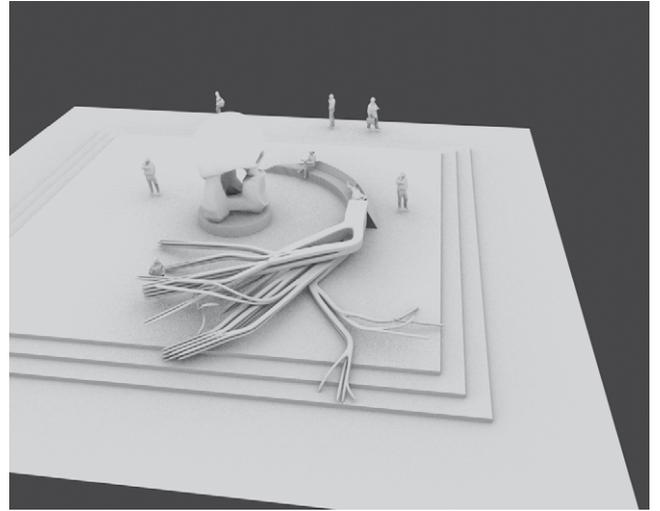


Fig. 20 The Inverse Kinematics model permitted more control over precise manipulations, but sacrificed the aspect of chance achieved with the physics engine simulation.

of the final piece. This model was really useful for studying the possibilities for the bifurcations, and establishing a language for the curves at the area of the splitting.

In the middle of the summer, things seemed to be going really well. Our study models were progressing nicely, we were well under budget, and had found a local Chicago supplier. Then the 1:1 samples arrived and everything fell apart. We had been hoping to use 4" diameter rubber tubes rather than solid strands to reduce the overall material quantity. But the tubes all had technical issues which made them unsuitable for the application. They were either too rigid (to compensate for being hollow) or too flexible (because they were hollow). Our solution was to use solid 2" diameter solid EPDM rubber cords. This was the largest diameter that would still have the flexibility we wanted for the piece at full scale. Our typical section

is a hexagonal grid, with the interval based on the diameter of the cords. Because area was a function of length times width, this switch effectively quadrupled our strand count – creating more much work for the installation downstream.

With these new parameters, we could no longer source appropriate licorice. So, we had the new issue of making a larger study model which would approximate the behavior of the 1:1 cords – an impossible task because physical characteristics do not scale like this. Ultimately, we opted for Buna rubber for the final study model. It was important for us to have a live study model on site both to convey the design intent to the fabrication team and to "react" to the situation in real time.

Concurrent with the physical models, we developed a series of digital models as well. These were all physics

simulations which used the open source Bullet physics engine (fig. 19). We learned a lot about both the joys and pains of physics simulations. At 64 strands the model was actually pretty friendly to build and use. But the primary issue was actually trying to animate the design process itself. *E.g.*, grabbing a cord, twisting it, tying a knot, etc. Because the Bullet engine focuses primarily on collision detection, we were somewhat forced to design using gravity and impacts. So, for instance, we might drop or slide our model, and hit it with something to wrap it around a cylinder. The results were certainly stochastic and unpredictable, and in many ways fascinating. But they tended to strongly privilege certain setups over others, and not always the ones we wanted

To address these limitations, we also developed an Inverse Kinematics (IK) model (fig. 20). This was essentially

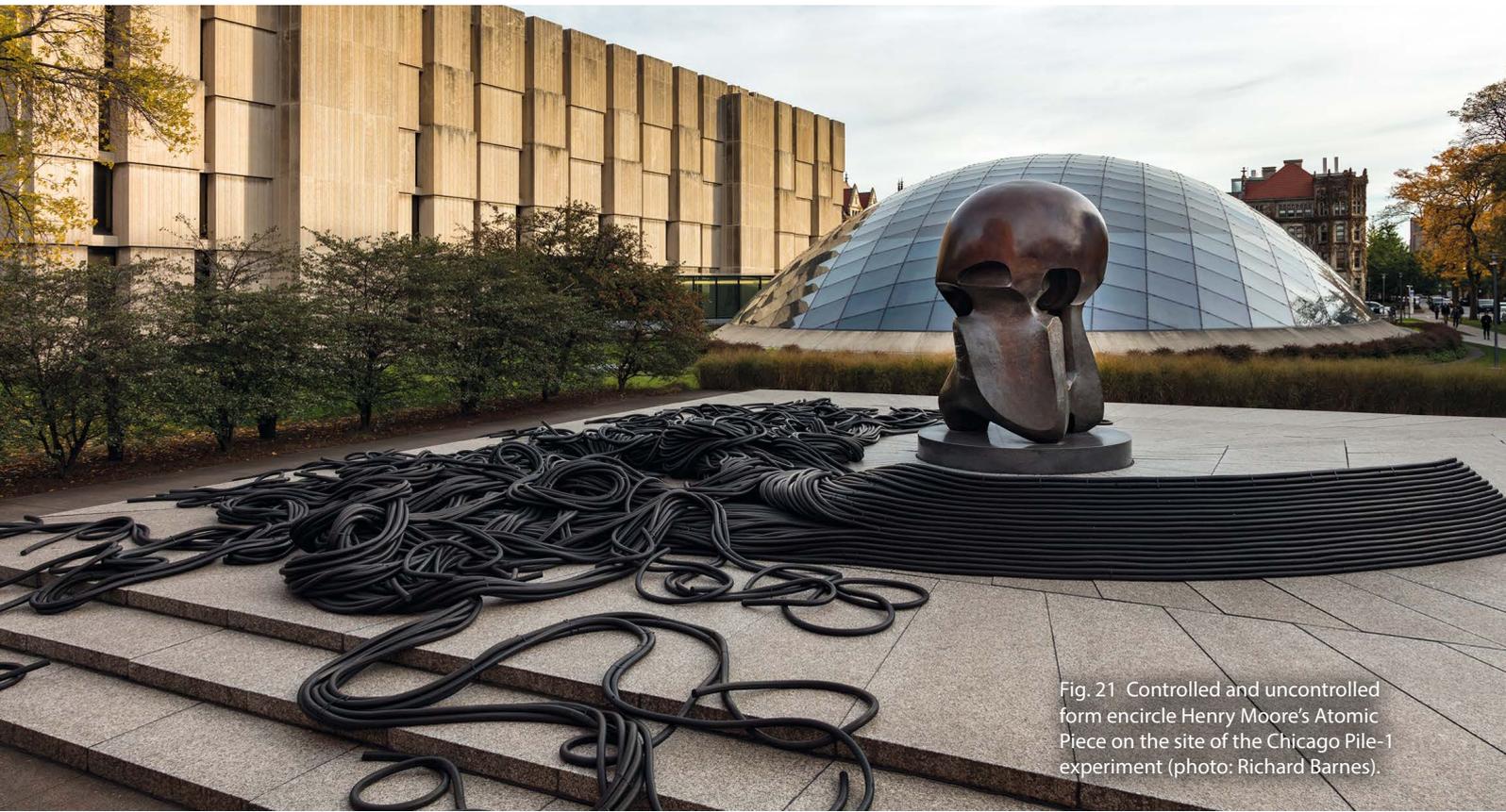


Fig. 21 Controlled and uncontrolled form encircle Henry Moore's Atomic Piece on the site of the Chicago Pile-1 experiment (photo: Richard Barnes).

a poseable armature representing our strands. In many ways, this had the opposite problem of the physics simulation. We had total control of how to position each joint, and could develop upstream dependencies. But we had lost the automated collision detection and also the “automatic” aspect. Instead of a simulation we were developing a character model. Furthermore, in the middle of this process, we switched from 64 to 241 strands. Our digital models needed to be rebuilt, and everything needed to be automated because of the increased complexity. Just like actual installation, on the computer the “bundling” of the strands is what really took time. Interestingly, total freedom for the strands was trivial to setup.

In early September, the strands arrived in Chicago and we flew out for the installation, where our concerns immediately became full-scale. Each

EPDM cord weighed approximately 120 pounds. And the glass library dome is pretty reflective in late summer, so it was a laborious, tactile experience. All the connections were made with UV-resistant zip-ties. Ultimately, our installation process paralleled the steps of building the physical model. However, after the fabrication experience, it is hard to imagine being able to accurately simulate the physicality of the actual strands in any alternative medium or scale.

In terms of the specific morphology of the tangle, there were a variety of considerations. We wanted the first split to be extremely dramatic. In our study models, we preferred for this split to be horizontal, and for the top to flop over itself, creating a wavelike form. This is a very heavy bundle, so this is something that had to be planned out before we finished the bench arc. Slightly downstream, we wanted areas that

were as high as the bench arc, and that also had a feeling of swirling around a local center. There is the implication of a local attractor of variable intensity which pulls the strands around itself. One tension was keeping the stranding legible, without having the overall gestalt be too tree-like. We wanted a slightly malevolent feeling in keeping with the idea of our own ambivalence about the nuclear threshold that was momentarily breached 75 years ago by Fermi and his team.

As an intervention on the site of the original experiment, the project implies a protean pile of material that begins as a simple arc and then dissolves into exponential complexity (fig. 21). It pays homage to the Henry Moore's Nuclear Energy by intensifying the site and partially enframing the sculpture on its vast plinth. The bench invites contemplation and directs focus to the Moore before it bifurcates into a tangled



Fig. 22 The bench begins with the gradual accretion of cords into a hex grid (photo: Richard Barnes).



Fig. 23 The truncated cone of the bench directs focus to Henry Moore's *Atomic Energy* (photo: Richard Barnes).



Fig. 24 The initial bifurcation quickly degenerates into disorder (photo: Richard Barnes).

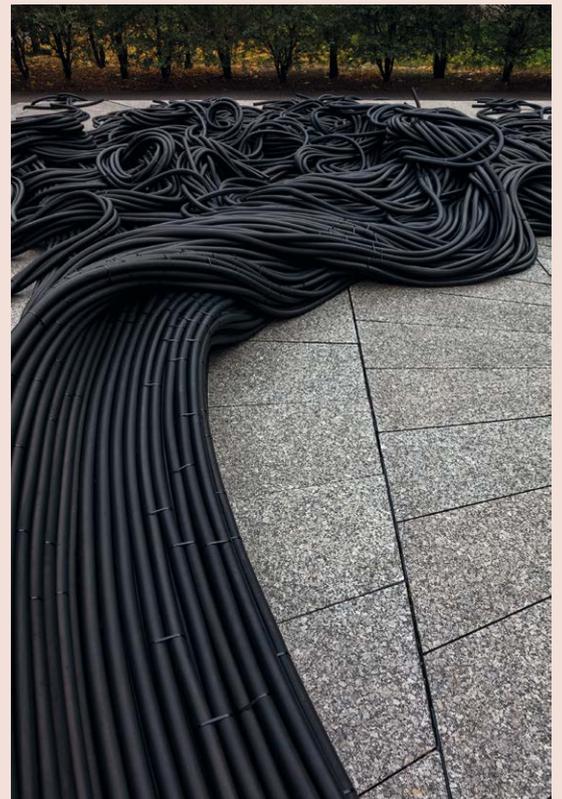


Fig 25 The first split initiates a dramatic sea-change. The top flops over in a wavelike form, collapsing the legible stack of the bench (photo: Richard Barnes).



Fig. 26 Intrepid visitors eschew the bench to explore the wildness (photo: Richard Barnes).

landscape background. An organized, seemingly solid form fragments into wild incoherence.

The cords are close-packed in a hexagonal array, forming a simple arc that serves as a bench (fig. 22). After forming a quarter of a circle, the form splits into two branches that explode the regular, controlled form of the arc. Those two branches then each twist and split into two more branches, and so on, exponentially increasing the complexity of the overall form until all the cords are writhing freely.

#### 4 Final considerations

When we were initially conceptualizing the project, it was important that the installation had a perceptual ambiguity, that is to say, two inseparable natures. This duality became a fundamental quality of the installation. From certain initial vantage

points, for example, as you approach the plinth, or view the Moore head on from the street, the curving, form is simple and Platonic – essentially a truncated cone. This region identifies with a classical, centered space, the realm of dutiful reflection (fig. 23).

But as you traverse the plinth, the form becomes restless and incoherent. The swirling induces a loss of orientation and an immersion that undermines modern notions of clarity and order. Architecturally speaking, we are excited about both models, but believe that swirling presents an opportunity for critical architecture to challenge many of the normative conditions and received ideas embedded in the world as typically constructed. Swirling space, however disturbing, may ultimately be a more accurate representation of our current world. In this installation, we were able to expand our extended interest

in looping and tendrils, as well as in an energy born of intertwining and abrupt changes in direction. This model of space and form calls for an adventurous spirit, but it seems like an inevitable exploration is due since the classical model is pretty exhausted (fig. 24).

This view exposes the initial bifurcation and breakdown from clear form to wildness (fig. 25). After the rupture, the coherent form of the arcing bench collapses into an amorphous swirl. The form as it breaks down and intensifies as successive branching erupts into loops, tendrils and knots. We were thinking about random behavior, and during fabrication looked to the heavy, dense, incredibly supple material to suggest its own wayward path. We were excited about the chaotic zone of the project, and anticipated that the free-form landscape would suggest all sorts of explorations and liberated uses to passerby. But we observed that



Fig. 27 Entangled in a sea of formlessness (photo: Richard Barnes).



Fig. 28 Progressive spirits at home in the disorder (photo: Richard Barnes).

people tend to prefer to occupy the safety and prescription of the bench. By the time most people become adults, they have been socialized to sit on a bench, and recognize its use – they have swallowed the lessons and conventions of public space and internalized them as acceptable ways to participate in society.

Fortunately, we witnessed a kindergarten outing that unleashed the right kind of fearless civilians on the site. We started to see exactly the kind

of play and acceptance of incoherence that we hoped to provoke (fig. 26).

The space of swirling and complexity, that is to say, the challenge and the promise of Nuclear Thresholds, is rife with peril and potential. We are now in an era which cannot unknow what it knows and revert to simpler times. According to the ancient Greeks, the three Furies would pursue and destroy mortals who had committed hubris by overstepping their limits, or crimes against the natural order (fig. 27).

In fear, the Greeks referred to them as the “Eumenides” – “The Kindly Ones”, rather than their true name the “Erinyes” – “The Vengeful Ones”, hoping that sweet talk would soften them.

However, now we are fully entangled, and neither flattery nor turning away will make a difference. Perhaps we need to take a lesson from the intrepid explorers and learn to make ourselves at home in this restless space – to make the best of it (fig. 28).

#### Zoë Prillinger and Luke Ogrydziak

Zoë Prillinger and Luke Ogrydziak are principals of Ogrydziak Prillinger Architects (OPA), an idea-driven office in San Francisco, California committed to finding design solutions that both expand the possibilities inherent in architecture and resonate within their particular context. OPA shapes and choreographs spatial experiences through the consideration of movement and formal logic, resulting in work that is distinctive for its conceptual clarity and physical presence. Zoë Prillinger and Luke Ogrydziak both received BA and M. Arch degrees from Princeton University and have taught at Harvard University and the University of California, Berkeley. OPA has received numerous American Institute of Architects San Francisco and California awards and the Architectural League of New York’s “Emerging Voices” award.



SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA



# 104° Congresso Nazionale

Arcavacata di Rende - Cosenza, 17 - 21 settembre 2018



# PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

<http://congresso.sif.it/>

## Lunedì 17 Settembre

- 9:00–11:00 Cerimonia di Inaugurazione, Saluti Autorità, Introduzione del Presidente, Premiazioni:
- Premio “Enrico Fermi”
  - Premio “Giuseppe Occhialini” SIF-IOP (Institute of Physics)
  - Premio “Friedel-Volterra” SIF-SFP (Société Française de Physique)
  - Premio per la Didattica o Storia della Fisica
  - Premio per la Comunicazione Scientifica
  - Borsa “Ettore Pancini”
  - Premio “Paolo Mazzoldi”
  - Premio “Giuliano Preparata”
  - Premio “Vincenzo Ferraro”
  - Premio SIF-SoNS “Neutrons Matter”
  - Premi per giovani laureati in Fisica dopo il maggio 2011 e dopo il maggio 2015
  - Premi per le Migliori Comunicazioni al Congresso Nazionale di Trento 2017
  - Medaglie ai Soci Benemeriti della SIF
- 11:00–12:00 Relazione Generale  
M. MILTON (Bureau international des poids et mesures, Sévres, France)  
*The re-definition of the base units of the SI: using the rules of nature to create the rules of measurement.*
- 12:00–13:00 Relazione Generale Sezione III (Astrofisica)  
M. BRANCHESI (GSSI, L’Aquila)  
*Nella nuova era dell’astrofisica multi-messaggera.*
- 15:00–16:00 Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, acceleratori e beni culturali)  
R. ASSMANN (DESY, Hamburg, Germany)  
*EuPRAXIA: European plasma research accelerator with excellence in applications.*
- 16:00–19:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni

## Martedì 18 Settembre

- 9:00–13:00 Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 14:30–15:30 Relazione Generale Sezione VI (Fisica applicata, acceleratori e beni culturali)  
Y. ELSHAYEB (Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt)  
*Science and technology for cultural heritage: success stories from Egypt.*
- 15:30–17:15 Assemblea Generale dei Soci della SIF
- Ordine del giorno:
- 1) Approvazione dell’ordine del giorno.
  - 2) Approvazione del verbale dell’Assemblea Generale dei Soci del 12 settembre 2017.
  - 3) Relazione del Presidente.
  - 4) Relazioni del Collegio dei Revisori dei Conti e approvazione dei bilanci consuntivi 2017.
  - 5) Ratifica e nomina dei Revisori dei Conti.
  - 6) Discussione e approvazione della Relazione del Presidente.
  - 7) Comitato Pari Opportunità (CPO) della SIF.
  - 8) Ordine Professionale dei Chimici e dei Fisici.
  - 9) Varie ed eventuali.
- 17:15–19:30 Tavola Rotonda SIF-SFP “Physics for development”.

# PROGRAMMA GENERALE DEL CONGRESSO

## Mercoledì 19 Settembre

- 9:00–13:00      Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 14:30–15:30      Relazione Generale Sezione VII (Didattica e storia della fisica)  
A. DE ANGELIS (Università di Udine e Padova, INFN e INAF, Sezione di Padova, LIP/IST, Lisboa, Portugal)  
*L'enigma dei raggi cosmici.*
- 15:30–16:30      Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)  
A. GUGLIELMETTI (Università di Milano e INFN, Sezione di Milano)  
*Astrofisica nucleare: una sfida interdisciplinare per la comunità italiana.*
- 16:30–17:30      Relazione Generale Sezione V (Biofisica e fisica medica)  
C.N. VAN DEN BERG (Department of Radiotherapy, University Medical Centre Utrecht, The Netherlands)  
*MRI-guided Radiotherapy: seeing what to treat!*
- 18:30              Visita al MAB e al Castello normanno-svevo
- 20:30              Cena Sociale

## Giovedì 20 Settembre

- 9:00–13:00      Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 14:30–15:30      Relazione Generale Sezione I (Fisica nucleare e subnucleare)  
A.D. POLOSA (Sapienza, Università di Roma)  
*La fisica delle risonanze esotiche.*
- 15:30–16:30      Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)  
M.S. VITIELLO (NEST, NANO-CNR, Pisa e Scuola Normale Superiore, Pisa)  
*Terahertz photonics and nano-electronics with 2D nanomaterials.*
- 16:30–19:00      Relazioni su Invito e Comunicazioni

## Venerdì 21 Settembre

- 9:00–12:00      Relazioni su Invito e Comunicazioni
- 12:00–13:00      Relazione Generale Sezione II (Fisica della materia)  
S. STRINGARI (Università di Trento, Povo, TN)  
*Synthetic gauge fields in ultracold atomic gases.*
- 14:30–15:30      Relazione Generale Sezione IV (Geofisica e fisica dell'ambiente)  
F. ROMANO (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Department of Seismology and Tectonophysics, Roma)  
*Mega-terremoti e relativi tsunami nel mondo e nel Mediterraneo.*
- 15:30–18:30      Relazioni su Invito e Comunicazioni

## FIFTY YEARS OF EPS

RÜDIGER VOSS

CERN, Geneva, Switzerland

The European Physical Society (EPS) was established in 1968, the *Società Italiana di Fisica* being amongst the founding members. In this article, I look back briefly at the beginnings of the EPS, and attempt to sketch its role in today's European science landscape.



Map of countries represented in the EPS through national physical societies.

### 1 The beginnings of the EPS

The year 1968 was a turning point in the history of post-war Europe which remains deeply engraved in our collective memory. A massive student movement which started on the campuses of US universities from protests against the Vietnam war spread to Europe, culminating in the May 1968 demonstrations in Paris, and similar events in many other European countries. Global politics were marked by East-West confrontation and the Cold War, and Europe was deeply divided by the "Iron Curtain", of which the Berlin Wall erected in 1961 was the most visible symbol. In March 1968, a series of protests of students and intellectuals against the communist regime in Poland was suppressed by security forces and on August 21, the Soviet Union and other Warsaw Pact states invaded Czechoslovakia with an army of more than 500000 to crush the movement of liberalization, democratisation and civil rights which had become known as the "Prague Spring".

Against this background and from today's perspective, it seems like a miracle that the European Physical Society was founded only a few weeks later, with representatives of the Czechoslovak Physical Society and the USSR Academy of Sciences sitting at the same table. As far as we know today, the EPS was the first learned society in Europe which federated physicists and physical societies from both sides of the iron curtain. Ever since, building scientific bridges across political divides has

been an inseparable part of our Society's DNA.

Of course, the EPS was not formed in a few weeks; a steering committee had been in place for more than two years to prepare the mission, the membership, and the governance of the new society. From the very beginning, Gilberto Bernardini, who at that time was the Rector of the Scuola Normale Superiore di Pisa, was a driving force of the EPS initiative and later became the first President. Bernardini had been CERN's first Director of Research in 1960-1961, and ever since had been a strong advocate of international collaboration in science. Although CERN did not play a formal institutional role in the establishment of the EPS, the CERN model of European cooperation and the support of other distinguished CERN physicists –amongst them Director-General Bernard Gregory– made a substantial impact on the genesis of the new society. And although CERN was principally an organization established by Western European countries (bloc-free Yugoslavia, which had been a founding member of CERN in 1954, had left in 1961 already), it had started in good time to develop close scientific contacts with the Soviet Union and other Eastern countries, notably through the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna. Inspired by the successful CERN model and conceived by a group of visionary physicists, the European Physical Society came officially into being, in Geneva, on 26 September 1968. The first scientific conference followed under the title "The

growth points of physics" on 8–12 April 1969 in Florence, in the prestigious venues of the Palazzo Vecchio and the Orsanmichele. A ceremony to celebrate the 50th anniversary will be held on September 28, 2018 in the same *Aula Magna* of the University of Geneva where the inaugural meeting took place in 1968.

It is worth noting that, from the very beginning, the vision of EPS' founding fathers went further than setting up a new scientific society. Bernardini, in his inaugural speech in the *Aula Magna*, expressed his expectation that the foundation of the EPS was "a demonstration of the determination of scientists to collaborate as closely as possible with a view to making their positive contribution to strengthen European cultural unity". International scientific cooperation has always played, and continues to play, an essential role in uniting countries with different cultures, different languages, and different political systems. Physics has traditionally been at the forefront of international collaboration, and the European Physical Society is a key player in this continuing effort.

This short article is not meant to be a systematic and comprehensive history of the EPS. The author is neither a science historian, nor is he an expert on the history of the EPS. A series of articles on different aspects of the historical development of our Society can be found in issues 49/2 and 49/3 of the EPS



The official inauguration ceremony of the European Physical Society in the Aula Magna of Geneva University, with the Rector D. van Berchem addressing the assembled physicists. On the left side of the podium is first EPS President Gilberto Bernardini. Photo CERN.

news magazine *Europhysics News*. More factual information about the EPS can be found on the website [eps.org](http://eps.org).

In this article, I prefer to focus on the role and position of the EPS in the European science landscape. Today, the EPS serves the European physics community in a twofold way: by promoting collaboration and fostering cohesion, across national borders and scientific disciplines, through the classical activities of a learned society such as conferences, publications, and prizes; and by reaching out to political decision makers, media, and the general public, promoting awareness of the importance of physics education and physics research in an increasingly complex and competitive environment. The unique diversity of our Society is reflected in a rich variety of activities and achievements.

## 2 Membership

When the constitution of the EPS was first drafted, one of the most hotly debated questions was whether it should be a society of individual members, or a “society of societies”, and this discussion continues until this day. The obvious compromise was to admit both categories, and this solution has stood the test of time. For national physical societies, the EPS provides a unique platform to share best practice and to undertake joint action at the European level, from the publication of scientific journals to the promotion of

Physics in the international policy arenas. Indeed the EPS has been hugely successful in federating the national physical societies: from 20 societies and similar organisations which participated in the 1968 foundation, the number has grown to 42, covering all of Europe with very few exceptions, plus Israel. These 42 societies today represent more than 130000 individual members.

To its 3500 Individual Members, the EPS offers a fertile ground for personal networking, multiple opportunities to contribute to shaping and implementing our society’s strategy and actions, and to participate in the scientific activities of EPS Divisions and Groups. Individual membership in the EPS is sometimes perceived as competing with membership in a national society; in reality it is a complement that opens a two-way road for exchanging personal knowledge between the national and the European level, in the best interest of both.

A third category that was introduced with the first constitution are the Associate Members. Initially geared at physics laboratories, its scope has subsequently been enlarged and now includes, in particular, industrial companies which are physics-based or undertake own physics research. EPS Associate Membership is a unique opportunity to demonstrate commitment and achievement in physics research, education, and outreach, and to showcase vision for sustainable strategies and practice. The number of Associate Members has been fluctuating

throughout EPS’ history and presently stands at about 40, dominated by public sector research institutions and universities.

Whereas there is only marginal room for increasing the number of member societies, the potential for broadening EPS’ base of stakeholders in the Individual and Associate Member categories is almost unlimited. Consequently, a vigorous campaign to attract new Associate Members is now being launched, based on a remodelling of this scheme to make it more attractive than it was in the past. Once in place, a similar campaign is expected to follow with the aim of attracting more Individual Members.

## 3 EPS as a learned society

### 3.1 Divisions and Groups

The work of Divisions and Groups is the scientific lifeblood of the European Physical Society; they are the forums where ideas are debated, projects conceived, results presented and achievements rewarded. They are scientifically autonomous but their work is critically important to underpin the EPS at large with the scientific substance that it needs to be a credible actor in areas such as science policy and outreach. Like in many other societies, the organisation of the Divisions –presently 12 in number– follows specific fields and subfields, in a dynamic manner: the “most recent kid on the block” is the Gravitational Physics Division,

established in 2017 following the Nobel Prize winning discovery of Gravitational Waves.

In contrast, EPS Groups –presently 6 in number– address principally cross-disciplinary themes and topics, in a very diverse way: examples are the Accelerator, History of Physics, or Physics for Development Groups.

### 3.2 Conferences

Notwithstanding the ease of electronic communication in the era of the Internet, conferences, workshops and schools remain important platforms to discuss new ideas and projects, present results, and to train the next generation of researchers. Most EPS Divisions and Groups organize at least one annual or biannual series of conferences under the common label “Europhysics Conference”; many of them are amongst the leading events not only in a European, but also in a global context. Conferences which are not officially organised by the EPS can apply for the label “EPS Recognised Conference”. The EPS Conference Committee ensures that all Europhysics and Recognised Conferences adhere to common, exacting standards of scientific quality and organization across all disciplines. The Equal Opportunities Committee has initiated a new Gender Monitoring Program for EPS supported conferences which, in the medium term, is expected to lead to more formal policies to ensure a fair representation of women physicists at EPS meetings.

### 3.3 Prizes, Distinctions and Awards

EPS prizes, awards and distinctions reward outstanding scientific achievement, encourage emerging talent, and recognize exceptional services to the physics community. More than once, senior EPS prizes have anticipated the award of the Nobel Prize: a recent example is the Giuseppe and Vanna Cocconi Prize for Particle Astrophysics which in 2017 was awarded to Rainer Weiss, Kip Thorne and Barry Barish, who also shared the Nobel Prize for Physics later in the same year. Most EPS prizes are awarded by Divisions in a specific discipline, and often presented at Europhysics Conferences. However, there are also EPS-wide prizes: the most prestigious is the Edison-Volta Prize awarded jointly by the EPS, Centro di Cultura Scientifica “Alessandro Volta” in Como, and Edison S.p.A. In 2018, this prize has been awarded to Alain Brillet, Karsten Danzmann, Alberto Giazotto and Jim Hough, also for their fundamental contributions to the discovery of gravitational waves. Another important, EPS-wide prize is the Emmy Noether Distinction awarded by the Equal Opportunity Committee, aimed at highlighting outstanding female scientists as role models for the young generation of woman physicists.

### 3.4 EPS Historic Sites

A recent but remarkably successful and popular addition to the broad range of EPS distinctions is the “Historic Sites” program, introduced only a few years ago under the leadership of former EPS President Luisa Cifarelli, now President of the Italian Physical Society. The EPS Historic Sites Award commemorates places in Europe important for the development and the history of physics; places associated with an event, discovery, research or body of work, by one or more individuals, that made important contributions to physics. More than 35 Historic Sites have been distinguished until this date, and at least five more are expected to follow in the second half of 2018. They make up a remarkably diverse list, as is exemplified by the sites selected in Italy: the AdA storage ring in Frascati, the Fermi Fountain in Rome, Villa Griffone in Bologna, the Hill of Arcetri in Florence, and the Mount Vesuvius Observatory. Two places have been recognised jointly by the EPS and the American Physical Society, both closely related to the life and work of Albert Einstein: the “Einstein House” in Berne, Switzerland, and the Institute for Advanced Study in Princeton, where Einstein spent most of the second half of his life after emigrating to the United States.

### 3.5 Publications

EPS publications cover the full range of scientific interests and activities of the Society, in multiple ways. The central news magazine “Europhysics News”, which today appears in five editions per year, has been in existence almost as long as the EPS itself. It has traditionally been –and still is– a print magazine but today is also available as a free-to-read online edition. It is complemented by the monthly Web-based e-EPS newsletter which focuses on news from the EPS and the European physics community more than on scientific content. Jointly with IOP Publishing, EPS publishes the “European Journal of Physics” which is widely recognised as one of the leading journals –arguably THE leading journal– devoted to physics teaching and physics education.

The flagship scientific journal of the EPS is EPL, former “Europhysics Letters”, which originated in 1986 principally from a fusion of “Lettere al Nuovo Cimento” and “Journal de Physique Lettres”. EPL is presently in the focus of much attention. While recognized as a high-quality journal, its mission to serve as a broadband journal with a strong interdisciplinary focus, and its traditional, subscription-based business model are challenged by stiff competition, a proliferation of new and highly specialised online-only

titles, and by the move towards Open Access publishing. To flourish in a rapidly shifting publishing landscape, EPL will need to reinvent itself with new editorial initiatives and a revised business model. In this process, EPL can rely on experienced production and distribution partners, and on its greatest asset: a high-profile, volunteer Editorial Board which ensures the highest standards of quality and integrity. I take this opportunity to thank Giorgio Benedek, who completed his term as Editor-in-Chief at the end of 2017, for his outstanding services to the journal.

## 4 EPS in the science policy arena: selected examples

### 4.1 Fostering career development: the Young Minds Project

The *Young Minds Project* is the flagship program of the EPS to support and federate the young generation of scientists which represents the future of our field, with a special emphasis on outreach activities and cross-border networking. The basic organisational units of the Young Minds (YM) Project are local Sections, which have increased in number from 40 to 49 in 2017, now representing 23 different countries –one of the greatest increments since the project was started in 2010. After handing over the Chair of the YM Action Committee to Eva Salvador in 2016, the outstanding leadership of Antigone Marino (Naples) in moving the project forward for many years has been rewarded with the well-deserved 2017 EPS Achievement Award. Since 2018, the YM Project is led by Roberta Caruso, again from Naples. The strong visibility of young women in the YM Project is just one aspect of EPS’ efforts to promote a better representation of female physicists, and to improve their career prospects at all levels. Other actions initiated by the EPS Equal Opportunities Committee, under the leadership of Lucia di Ciaccio, are the Gender Monitoring Program for EPS supported conferences and the award of the Emmy Noether Distinction, which have both been mentioned earlier in this article.

### 4.2 European Integration

(Un)equal opportunities of a different kind are on the agenda of the Committee on European Integration (CEI). Almost thirty years after the fall of the iron curtain, research and funding opportunities continue to be unevenly distributed across Europe, and disparities persist between East and West. The CEI addresses the problem through the strengthening of regional cooperation between Eastern, Central, and South-East European countries, and with other Member

Societies. In the same spirit, the EPS supports the new initiative for a South East Europe International Institute for Sustainable Technologies (SEEIST).

#### 4.3 The EPS Point of Presence in Brussels

For several years, the EPS has undertaken efforts to sharpen its science policy profile, principally through setting up a Point of Presence in Brussels, and through the establishment of a prestigious Advisory Board on Science Policy. A focal point is the participation in the ongoing stakeholder consultations for preparing the next Framework Program of the European Commission (FP9), now officially called *Horizon Europe*. The EPS is one of almost 12'000 organisations registered in the EU Transparency Register –not all of them concerned with science policy and Framework Programs, but the sheer number illustrates the challenge of making our voice heard in Brussels. Increased efforts will be needed to expand our networks, and to team up with partner organisations to defend common interests. In an environment where research programs and funding opportunities are increasingly organised around societal rather than scientific challenges, the EPS must advocate a healthy and sustained balance between basic and applied research. Europe must become a level playing field for science with no second-class citizens: *Horizon Europe* must not only provide a fair and balanced access to funds, research opportunities infrastructures for all EU countries, but should also remain open to participation from non-EU countries, following the example of the successful association of countries like Norway and Switzerland to *Horizon2020*. Of course, the Brexit will add a new dimension of unprecedented size and complexity to this discussion. But as mentioned before, building scientific bridges across political divides has always been an unalienable part of the Mission of the EPS, in the best interest of a strong cohesion of the European physics community.

In the same spirit, the EPS plays an active part in the ongoing Open Science debate launched by the European Commission, principally through former President Christophe Rossel who serves as a member of the EC Open Science Policy Platform.

To be a credible actor on the policy stage, the EPS needs to establish a comprehensive and robust evidence base. The study on "The importance of physics to the economies of Europe", first published to much acclaim in 2012, will be updated based on recent statistical data. The backbone, however, will be the framing document "Grand challenges on the Horizon 2050", designed to address the



The EPS secretariat on the campus of the Université de Haute-Alsace in Mulhouse (France).  
Photo credit: EPS/Gina Gunaratnam.

scientific and the societal challenges which physics is expected to face between today and the middle of the twenty-first century. This project is making good progress and will be complemented by a meeting of the *EPS Forum Physics and Society* on 29 September 2018, the day following the 50th anniversary celebration.

#### 4.4 Global partnerships

Scientific cooperation is becoming an increasingly global endeavour which is reflected in enhanced collaboration with non-European partner societies and organisations. For many years, the EPS has teamed up with the American Physical Society (APS) and the Association of Asia-Pacific Physical Societies (AAPPS) for joint programs and actions; the EPS is also an observer to the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP). An important focal point is cooperation on Physics for Development, with emphasis on Africa and the Middle East; together with other partners, EPS and APS support the SESAME light source project based in Jordan through a travel grant program for visiting scientists.

A universal concern of the scientific community is the defence of freedom of science, which encompasses the freedom to practice science, free from non-scientific objectives and constraints, as much the

personal freedom and the respect of human rights of individual scientists. This is an area where the EPS has been active in the past, when it defended, to mention just one prominent example, the interests of dissident Soviet scientists Andrei Sakharov and Yuri Orlov. Unfortunately, recent events and developments in countries like Hungary and Turkey have taught us that freedom of science is an important and fragile good that we must never lose sight of, even in a European context.

#### 5 Conclusions

On its fiftieth anniversary, the European Physical Society can proudly look back at an equal number of years of distinguished service to the physics community. Supported by a small but professional team at the headquarters in Mulhouse, the EPS is still mostly a volunteer effort, and this is a golden opportunity to thank the many people who, throughout the years, have worked hard to make the EPS grow and flourish. Quite fortunately, they are far too numerous to list all of them here by name. However, I wish to say a special *grazie mille* to the *Società Italiana di Fisica*, which has been one of the founding members of the EPS, for fifty years of wonderful partnership and unflinching support.

Rüdiger Voss

Rüdiger Voss received a PhD in Physics from the Ludwig-Maximilians-University in Munich. He spent most of his professional life at CERN, starting with experiments at the Intersecting Storage Rings (ISR) under the leadership of Carlo Rubbia. Focal points of his career have been deep inelastic muon scattering at the Super Proton Synchrotron (SPS) and the design and construction of the ATLAS detector at the LHC. Before retiring from CERN in 2016, he served for several years as Head of International Relations. He has been President of the EPS since April 2017.

## IL NUOVO CIMENTO 150, 100, 50 ANNI FA

### 150 ANNI FA

Enrico Betti (1823-1892), nel 1848 combatté nella guerra di indipendenza col Battaglione Universitario toscano, partecipando alla battaglia di Curtatone. A Pisa, dove venne anche in contatto con Riemann durante il suo soggiorno dal 1863 al 1865, lavorò sull'algebra, allo studio degli spazi a molte dimensioni (con i "numeri di Betti" come saranno chiamati da Poincaré) e alla fisica matematica. Nel 1884 divenne senatore del Regno. Si veda "I Fisici Senatori: 1848-1943" di M. Leone e N. Robotti a cura della SIF di prossima pubblicazione.

Riferendosi a questa nota, il 5 settembre 1868, James Clerk Maxwell scriveva a W. Thomson: "Betti mi ha mandato un'ipotesi elettromagnetica. Egli suppone che una corrente chiusa sia come un magnete circolare con una variazione periodica di intensità, e che il potenziale si propaghi con una certa velocità." La velocità assunta da Betti, pur senza dimostrazione, è la velocità della luce. Ricordo che Maxwell aveva pubblicato "On the dynamical theory of the electromagnetic field" nel 1865 e che proprio nel 1868 aveva fatto il suo esperimento sul rapporto delle unità di misura della carica.

Da "Sopra l'elettrodinamica" di Enrico Betti. Il Nuovo Cimento, 27 (1867) 402.

Gauss in una lettera a Weber, pubblicata nel Volume V della Collezione delle sue Opere, scriveva nel 1845 che per dedurre le forze da aggiungersi a quella che si esercita tra le particelle di elettricità in quiete quando esse sono in moto relativo, convenga supporre che l'azione non sia istantanea, ma che si propaghi col tempo, in modo simile a quello che si è trovato per la luce, ed aggiungeva che lasciò questo genere di ricerche nel 1836, senza riuscirvi.

*Dopo aver ricordato che neppure Riemann ci era riuscito, scrive*

Quindi mi sembra che non sarà senza importanza il dimostrare come si possano spiegare le azioni elettrodinamiche per mezzo della loro propagazione col tempo.

*Sviluppati i calcoli, conclude*

Dunque le azioni elettrodinamiche possono spiegarsi, ammettendo che si propaghino nello spazio con velocità uguale a quella della luce, che si esercitano secondo la legge di Newton come le azioni elettrostatiche.

Pisa, 25 maggio 1868

### 100 ANNI FA

Orso Maria Corbino (1876-1937) fu professore a Messina e, dal 1908, a Roma. Fu segretario della SIF dal 1910 al 1914, contribuendo sostanzialmente alla redazione del Nuovo Cimento, e presidente dal 1914 al 1919. Le sue ricerche si rivolsero al moto degli elettroni in campi magnetici. Scoprì l'"effetto Corbino", variante dell'effetto Hall, ma su di una corrente radiale in un disco metallico in rotazione. Divenne senatore nel 1920, Ministro dell'Istruzione nel 1921 e dell'Economia nel 1923. Fondamentale fu il suo contributo a partire dal 1926 alla creazione e al sostegno del gruppo di Fermi di Via Panisperna. In questa nota, Corbino calcola l'evoluzione della corrente secondaria in un "moderno" rocchetto d'induzione.

Da "Sul funzionamento del rocchetto di induzione con gli interruttori di tipo recente" di O. M. Corbino. Il Nuovo Cimento, 15 (1918) 10.

L'uso dei moderni tipi di interruttori rotativi rapidi nei quali la corrente primaria viene stabilita e interrotta da un getto rotante di mercurio in seno a un gas inerte e con grande frequenza, ha profondamente modificato le condizioni antiche di funzionamento del rocchetto d'induzione...

Ottenere dal rocchetto, in tali condizioni correnti secondarie intense e assolutamente unilaterali,

Usa il QR code per visualizzare gli effetti Hall e Corbino.



come occorrono, ad esempio, nella radiografia intensiva, richiede un esame accurato teorico e sperimentale del funzionamento del rochetto.

Questo esame è stato iniziato e approfondito da qualche tempo con varie ricerche mie e del dott. Trabacchi:... In questa nota sarà dedotta la legge di svolgimento della corrente secondaria e la potenza ottenibile al secondario.

## 50 ANNI FA

Nella sua "Nobel lecture" l'11 dicembre 1997, Samuel Ting scriverà: "Historically, to my knowledge, the Zichichi Group was the first one to use hadron-hadron collisions to study  $e^+e^-$  yields from proton accelerators. This group was the first to develop the earlier shower development method so as to greatly increase the  $e/\pi$  rejection". Ting aveva scoperto in questo modo la  $J/\psi$ , mesone vettoriale composto da un quark e un antiquark charm, mentre la  $\phi$  lo è per gli strani. La  $\phi$  non fu scoperta in questo modo, ma questa misura fu molto importante per la comprensione dei mesoni vettori. Zichichi e il suo gruppo avevano inventato la tecnica per discriminare i rarissimi elettroni dai pioni, con un potere di discriminazione di circa  $10^4$  in T. Massam *et al.*, *Il Nuovo Cimento*, 39 (1963) 464.

Da "Observation of the rare decay mode of the  $\phi$  meson:  $\phi \rightarrow e^+e^-$ " di D. Bollini *et al.*, *Il Nuovo Cimento A*, 56 (1968) 1173.

The decay of the neutral state  $V^0$  into an electron-positron pair was identified by means of two large electron detectors, similar to those originally designed by us in order to achieve a high rejection power against pions. The knowledge of the  $e^+e^-$  energies and of their opening angle allowed a second discrimination of the  $V^0$  mass and an increase in the rejection against spurious events. The weighted mean of the two mass values was used in the analysis.

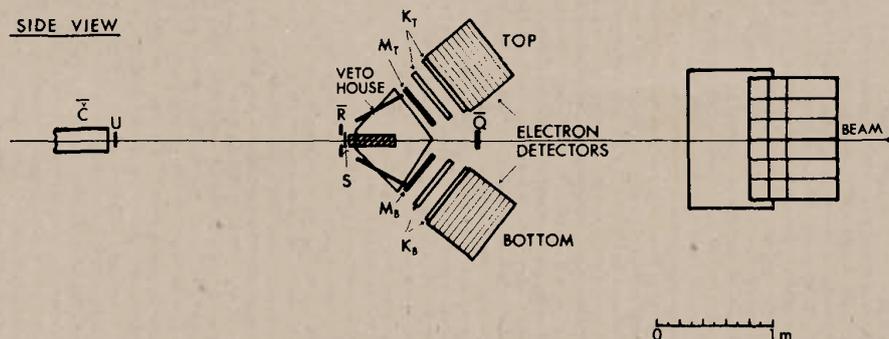


Figure 1 shows a sketch of the experimental set-up, consisting of a beam telescope, a liquid-hydrogen target, two electron detectors and two neutron counters. The electron detectors "TOP" and "BOTTOM" were placed respectively at  $36^\circ$  above and below the beam line (*vedi figura*). The neutron counters "RIGHT" and "LEFT" were set at an angle of  $26^\circ$  to the right and the left of the beam (*qui non mostrati*).

## KLAATU, BARADA, NIKTO: GLI STEREOTIPI HOLLYWOODIANI DELLA NOSTRA PROFESSIONE

SILVIA SORIA

CPO-SIF

“Scientia redemptor Mundi” versus “Scientia gratia Scientiae”: l’eterno dilemma hamletiano di Hollywood per rappresentare gli scienziati e le scienziate.

Qualche anno fa le mie ragazze giocavano con una loro amica. Sentendole ridere mi sono avvicinata per chiedere a cosa stessero giocando. La loro risposta, all’unisono, fu: “alle scienziate pazze, mamma”. Con alta probabilità, il mio viso ha tradito stupore e perplessità, motivo per il quale hanno aggiunto “non tu, mamma”. Per fortuna l’unico elemento strambo che indossavano era un berretto stile aviatore anni '30 e posso garantire che il loro pomeriggio è stato di pazza gioia. Questo ricordo personale fa capire quanto purtroppo certi stereotipi su gli scienziati e scienziate siano ben vivi e radicati nell’inconscio della nostra società ancora nel secolo XXI.

Nel 1957 Margaret Mead fece uno studio sociale pioniero per capire come i ragazzi e le ragazze americani delle scuole secondarie superiori immaginassero gli scienziati, usando un campione di 35000 persone. Nel 1983 David Wade Chambers ripeté lo studio usando un campione di 4800 bambini e bambine delle scuole primarie di Montreal. Nel 2003 Christopher Frayling rifece lo studio con un campione ancora più piccolo (140) ma sempre delle scuole primarie [1]. Il risultato è molto simile. Indossiamo camici da laboratorio (rigorosamente bianchi), siamo circondati da pipette fumanti, abbiamo una chioma selvaggia bianca ed *eureka* forma parte delle nostre esclamazioni quotidiane. Portiamo occhiali, ma grazie al progresso della scienza e della tecnologia, le lenti non sono più fondi di vecchie bottiglie di Coca-Cola. L’unico dato incoraggiante è che da zero scienziate disegnate nel 1957 siamo arrivate al 24% nel 2003, anche se soltanto le ragazze disegnano scienziate. Morale della favola, lo stereotipo sociale è cambiato assai poco in quasi un secolo.

Siamo matti, cattivi e pericolosi. Siamo Viktor Frankenstein con la chioma di Einstein. Questa semplificazione non è nuova ed è spesso dovuta alla paura del potere e del cambiamento che sono intrinseci nella scienza. Il sentimento o l’atteggiamento verso la scienza è spesso ambivalente: la società ottiene grandi benefici dalla scienza ma, in contemporanea, vive una profonda paura per il potere che ne deriva, per l’uomo che pretende essere Dio. La scienza è una forza culturale immensa, ma non è democratica; la conoscenza rimane in mano di pochi: gli scienziati e le scienziate. La mitologia greca è piena di umani pesantemente puniti per essere andati oltre (Pandora, Prometeo, Icaro) e anche Socrate fu condannato a morte per le sue riflessioni sulla nozione di verità e per il suo tentativo di spiegare il mondo naturale come un fenomeno scientifico.

Mentre prima del 1800 si ha una astratta paura della Scienza, con l’avvento delle specializzazioni, la paura diventa più concreta. Nell’era post-darwinista, il timore nasce dalla medicina e dalla biologia (*Frankenstein*-Mary Shelly, 1818 e 1831, *Dr. Jekyll and Mr. Hyde* -R. L. Stevenson, 1886, *L’isola del Dr. Moreau*-H.G. Wells, 1896). Dopo la prima guerra mondiale la chimica perde l’innocenza con la scoperta dei gas nervini (Fritz Haber) mentre dopo la seconda guerra mondiale è la fisica la disciplina che incute terrore grazie alla bomba atomica (Julius Robert Oppenheimer) per lasciar poi il passo alla genetica.

La letteratura di ogni epoca si rifà alla disciplina più evoluta del momento, coerenza che si mantiene anche con l’avvento del cinema, strumento mediatico entro cui gli stereotipi, già esistenti in letteratura, si diffondono ancora più ampiamente e in modo sorprendente. Siamo diventati figure semiotiche, non realistiche ma che rappresentano la visione generale della società. La società è però molto patriarcale, se non altro quella hollywoodiana, come si deduce dalle percentuali di scienziate nei film e soprattutto dagli stereotipi. Come si illustrerà a breve, le donne nei film di scienza sono state nei migliori dei casi assistenti di laboratorio, portano occhiali e camice bianco e nei peggiori di casi sono *La moglie di Frankenstein* (fig. 1). Una caratteristica comune è la grande capacità toracica: si urla nell’ottava più acuta quando appare il mostro o il cattivo.

Rosslyn Haynes descrisse per la prima volta gli stereotipi degli scienziati attraverso la storia nel suo pionieristico libro [2], rivisto e ampliato di recente [3]. Ovviamente questi archetipi sono ricorrenti ma non sempre unisex. Certi archetipi sono soltanto validi per scienziati, certi solo per scienziate [4], alcuni

validi per entrambi i due generi. I film seguono il trend della società, le scienziate nei film sono una minoranza anche se la loro presenza è aumentata negli ultimi anni in maniera importante (le scienziate compaiono, ad esempio, in molti film britannici a partire dal 1950). Nel campione di 60 film relativo al periodo 1920–2001 di Flicker [4] solo il 18% ha per protagonista una scienziate. Jocelyn Steinke [5] usa un campione di 74 film compresi entro un periodo di tempo più ristretto (dal 1991 al 2001) con un incremento della percentuale di presenza al 31%. Sidney Perkowitz [6] nel 2006 allarga il campione fino a 382 film usando IMDb (Internet Movie Database), ma la percentuale di presenza si ferma al 22%. Perkowitz argomenta che la percentuale di scienziate nel cinema è abbastanza simile al numero di scienziate che lavorano in STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) negli Stati Uniti (25%).

Per fattori meramente statistici le scienziate, insomma, contribuiscono poco a perpetuare il mito negativo [3, 4] (ma stiamo decisamente migliorando) ma, soprattutto, le scienziate nei film sono nella grande maggioranza iper-sessualizzate [3-5].

Già nel medioevo eravamo cattivi (apprendisti di stregone), eravamo degli alchimisti che avevamo fatto un patto con il diavolo in cambio di ricchezza, potere e vita eterna. La pietra filosofale, l’elisir dell’eterna



Fig. 1

gioventù, gli omuncoli e la macchina di moto perpetuo sono degli esempi delle promesse (e delle truffe) degli alchimisti. Gli omuncoli, ovviamente, nulla hanno da spartire con il Golem di Praga (1580), parte integrante della tradizione talmudica ma non dell'alchimia. Doctor Faustus (Marlowe, 1604; Goethe 1828) è l'archetipo dell'**alchimista diabolico** anche se noi spesso lo percepiamo come il Faust dell'opera di Gounod (1859) che vende la sua anima a Mefistofele in cambio dell'amore carnale di Margherita. Il mio ciarlatano preferito è Dulcamara, coprotagonista dell'opera *L'Elisir di Amore* di Donizetti (1832). Victor Frankenstein più che un diabolico alchimista possiamo considerarlo un ricercatore inumano del periodo Romantico. Nel mondo del cinema, fin dagli albori, troviamo i primi scienziati di George Méliès, *Faust* (1897) e poi l'ingegnere britannico William Crackford nel film *Le quatre cents farces du Diable* nel 1906, sempre basato sul mito faustiano. Non si trovano donne alchimiste anche perché sarebbero state considerate streghe e quindi condannate a morte ipso facto.

Sir Francis Bacon è il primo a definire lo stereotipo dello scienziato buono, nobile, eroe e salvatore della società: *scientia redemptor mundi*. La sua utopia intitolata *New Atlantis* (1627) propone un approccio sperimentale più empirico capace di disseminare risultati e applicazioni benefiche nella società. La Royal Society of London fu fondata nel 1662 basandosi sul rigoroso codice etico di Bacon. Sir Isaac Newton è l'archetipo dello **scienziato saggio**, nobile ed umile (anche se era anche ossessionato con l'alchimia!). Lo scienziato come eroe lo troviamo nelle utopie scientifiche di H.G. Wells, poi riprodotte nel cinema, mentre nella vita reale risalta Leo Szilard, che volle brevettare ogni sua scoperta atomica per evitarne un uso distorto. In questo caso, siamo diventati santi, brillanti intellettuali di morale superiore. La frase del titolo, *Klaatu, Barada, Nikto*, fa parte della cultura popolare e della fantascienza. La doveva dire la protagonista al robot Gort nel film *Ultimatum alla Terra* (1951), e il suo significato è che c'è speranza per la Terra, se gli scienziati possono essere coinvolti. Dello stesso anno è il film *Quando i mondi si scontrano* (tratto dall'omonimo romanzo *When Worlds Collide* del 1933). In questo caso l'eroe è il più grande fisico (del mondo?). In questa categoria, possiamo includere la Dottoressa Emma Russell che salva l'umanità dai cattivi nascondendo la formula della fusione fredda nel suo reggiseno nel film *Il Santo* (1997). Rientrano in questo archetipo anche detective come Sherlock Holmes o inventori come Benjamin Franklin, Alexander Graham Bell, Nikola Tesla, Tomas Alva Edison; ci sono, anche, delle grande inventrici purtroppo dimenticate come Hedi Lamarr, ad esempio. Hollywood dedicò diversi film agli inventori-salvatori (Pasteur-1936, Bell-1940, Edison-1940, Curie-1943); più recente è il film dedicato alle programmatrici afro-americane della Nasa (*Il diritto di contare*, 2016). Del 1953 è il biopic dedicato alla prima donna chirurga, Dr. Emily Dunning (*La dama bianca*).

Tantissimi scienziati salvatori si trovano nei film o sceneggiati per la TV di fantascienza come *Star Trek*, *Stargate* e *Flash Gordon*. Un notevole passo avanti è stato fatto nel film *The Martian* (2015) dove lo scienziato-esploratore viene salvato da una comandante. Infine, non dimentichiamo il medico salvatore dell'umanità Van Helsing (*Dracula*, Bram Stoker, 1897). La figura di Van Helsing venne parodiata nel film di Roman Polanski (*Per favore non mordermi sul collo*, 1967, **fig. 2**); in questo caso Van Helsing assomiglia molto di più ad Albert Einstein che a un medico-filosofo-metafisico superstizioso del 1897.

Dopo Alexander von Humboldt, appare lo **scienziato avventuriero**, il più attrattivo stereotipo dello scienziato moderno che emerge nella letteratura della fine del secolo XIX. I libri di Jules Verne sono un grande esempio, così come i film basati su suoi romanzi (*Viaggio al centro della Terra* del 1959

con remake 3D nel 2008). Verne era un ingegnere e i suoi libri sono pieni di spiegazioni scientifiche o parascientifiche. I suoi protagonisti sono eccentrici ma pieni di risorse; coraggiosi, ottimisti e di sangue freddo accettano eroicamente il pericolo. Vi sono diversi film con protagonisti delle scienziate avventuriere. Nel genere biopic troviamo *Gorilla nella nebbia* (1988) basato sulla vita di Diane Fossey (Sigourney Weaver), ad esempio. Nel 1993 in *Jurassic Park* troviamo come co-protagonista una paleo-botanica (Laura Dern) e una paleontologa nel sequel del 1997 (Julianne Moore). Helen Hunt è Dr. Horton-Harding in *Twister* (1996), mentre nel 1997 Anna Heche da vita alla geologa Dr. Amy Barnes in *Vulcano-Los Angeles*. Nel 1999 una scienziata nucleare Dr. Christmas Jones (Denise Richards) è la protagonista di un film di James Bond (Pierce Brosnan), *Il mondo non basta*. In *The Net-Intrappolata nella rete* (1995) Sandra Bullock è Angela Bennett, una hacker asociale che diventa un'eroina di azione, quindi, due stereotipi in una sola donna. Nel 2000, Sara Holland (Marcia Gay Harden) è l'ingegnere capo in *Space Cowboys*.

Di azione estrema è il film del 2001 *Tomb Raider* con protagonista Lara Croft (Angelina Jolie) un'archeologa non una scienziata STEM. Sempre nel campo dell'archeologia è la volta di Evelyn Carnahan in *La Mummia-Il ritorno* del 2001. Indiana Jones e tutti i sequel sono i film di grande azione e avventura, si può dire, per eccellenza.

Con alta probabilità lo **scienziato svanito** è uno degli stereotipi preferiti dei cartoni animati, dei comics e di Hollywood. Sono degli eccentrici ossessionati per la ricerca che portano calzini spaiati; sono socialmente inadatti ma fondamentalmente benigni per la società. È bene ricordare quanto, nella prima fase di sviluppo della ricerca, siano stati ridicolizzati sia i fondatori della Royal Society sia i virtuosi (dilettanti della scienza ossessionati dalla scoperta). Samuel Butler scrisse un lungo poema-satira (*L'Elefante sulla luna*, 1676) prendendo di mira diversi membri della Royal Society, così come Margaret Cavendish con il suo testo di satira *Il mondo sfavillante*. Anche Jonathan Swift nei *Viaggi di Gulliver* (1726) segnalò il pericolo di venerare la scienza. Nella società attuale, un suo grande limite è anche quello di non essere in grado di bilanciare la vita personale e la ricerca. Nel mondo reale due grandi scienziati rispecchiano perfettamente lo stereotipo di scienziato svanito, Albert Einstein (**fig. 3**) e Marie Curie (**fig. 4**). Questo stereotipo è, quindi, anche valido per le scienziate; si veda il biopic su Marie Curie (1943) oppure il film *Watch your Stern* (1960) dove Agatha Potter (Hatti Jacques), una scienziata (anche ammiraglio) britannica è chiamata a spiegare i difetti di un nuovo modello di torpeda. Altre scienziate svanite sono Dr. Diana Reddin (Emma Thompson) in *Junior* (1994); Dr. Allison Reed (Julianne Moore) in *Evolution* (2001); Dr. Diane Farrow (Sandra Bullock) in *Love Potion #9* (1992). *Un Professore fra le nuvole* (1961), *Le folli notti del Dr. Jerryll* (1963) con Jerry Lewis nei panni di Dr. Jekyll e la versione del 1996 con Eddie Murphy (*Il professore matto*), *Ritorno al Futuro* (1985) e *Tesoro, mi si sono ristretti i ragazzi* (1989) sono, invece, chiari esempi dello stereotipo scienziato svanito.

Un altro stereotipo alquanto amato dalla fiction è quello dello **scienziato pazzo** che è anche disumano, cattivo e pericoloso. Insomma, l'altra faccia della medaglia dello **scienziato saggio**. Spesso rovesciando i fattori, Newton

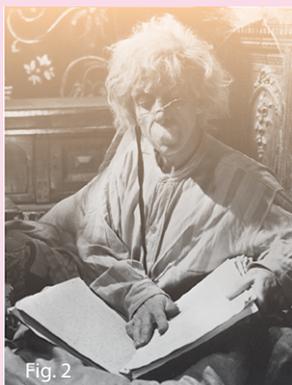


Fig. 2

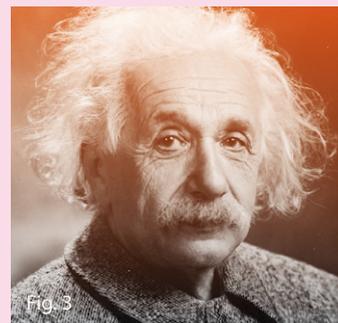


Fig. 3



Fig. 4

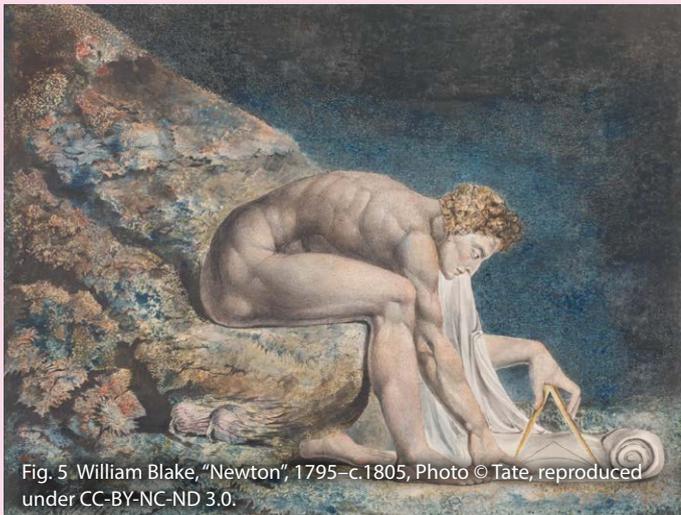


Fig. 5 William Blake, "Newton", 1795–c.1805, Photo © Tate, reproduced under CC-BY-NC-ND 3.0.

(fig. 5) passò da essere considerato un saggio ad essere ridicolizzato durante il Romanticismo. William Blake definiva Newton, Bacon e Locke la trinità infernale. Bisogna distinguere tra i diversi paesi la nozione di Romanticismo rapportata alla Scienza perché la loro visione è molto diversa. Il Romanticismo inglese identifica la scienza come tecnologia e, quindi, con la Rivoluzione Industriale, che viene condannata per l'inquinamento che produce e, soprattutto, per le pessime condizioni lavorative degli operai e operaie. L'archetipo dello scienziato pazzo, in questo caso, è Frankenstein, sinonimo di esperimento fuori controllo. Frankenstein è il vero mostro. I romantici tedeschi, più preparati scientificamente, non sempre collegano la scienza con il diavolo. Nelle *Affinità elettive* (1809) Goethe dichiara che le relazioni umane si basano sulle leggi della chimica. I romantici americani invece considerano l'eccesso di razionalità come un fattore psicologico negativo. I romanzi di Nathaniel Hawthorne ne sono un chiaro esempio (*La voglia*-1845, *La figlia di Rappaccini*-1844).

Frankenstein è lo scienziato più amato da Hollywood con un elevato numero di pellicole ad iniziare dal 1910. La prima versione parlata dette fama mondiale a Boris Karloff nel 1931 e creò l'iconografia del mostro con una somiglianza raccapricciante ad una acquaforte di Francisco Goya, *Los Chinchillas* (1799). Nel 1935 apparve *La moglie di Frankenstein* a cui fa seguito una lunga lista che contiene la commedia di Mel Brooks, *Frankenstein Junior* (1974), lo spettacolare film di Kenneth Branagh del 1994 e la versione del 2007 sempre dedicata a *Frankenstein*. In questa versione, Frankenstein è una scienziata (genetista e biotecnologa) che tenta di clonare il proprio figlio attraverso cellule madri per ottenere degli organi per salvarlo. Purtroppo crea un mostro. Un'altra genetista pazza è la Dr. Elsa Kast (Sarah Polley) in *Splice* (2009), capace d'ignorare considerazioni etiche e morali per il proprio beneficio, creando chimere umane per ricerche farmaceutiche.

Nel 1920 appaiono due grandi film del cinema muto, capisaldi dell'espressionismo tedesco, con protagonisti due scienziati pazzi, uno nel campo della psicologia, il Dr. Caligari (*Il gabinetto del dottor Caligari*, Robert Wiene) e uno nel campo della robotica, il Dr. Rotwang (*Metropolis*, Fritz Lang, fig. 6). Nel 1936 esce un film di Tod Browning, *La bambola del diavolo*, fig. 7, che ci fa conoscere una delle migliori scienziate pazze, cattive e pericolose nella storia di Hollywood. Sempre nell'era pre-nucleare troviamo



Fig. 6



Fig. 7

*Il raggio invisibile* (1936) con Boris Karloff e Bela Lugosi nei ruoli di scienziato pazzo e scienziato saggio, pellicola che possiamo considerare come capostipite dei film sulla minaccia nucleare. Un altro scienziato pazzo noto è sicuramente Dr. Cyclops (1940). Da annoverare tra i pazzi famosi, prima in letteratura e poi nel mondo del cinema, è, sicuramente, il Dr. Moreau (*L'isola delle anime perdute*-1932, *L'isola del Dr. Moreau*-1977, *L'isola perduta*-1996). Come Frankenstein, il Dr. Moreau è un medico-biologo malato di megalomania. Dopo il 1945 il megalomane cattivo per eccellenza è il fisico nucleare a tutti noto come il Dr. Stranamore (*Il dottor Stranamore - Ovvero: come ho imparato a non preoccuparmi e ad amare la bomba*, 1963). Stranamore raffigura Wernher von Braun, Edward Teller e Henry Kissinger in una combinazione macabra di scienziato pazzo e scienziato statale.

Lo stereotipo al femminile si materializza nelle scienziate matte come Dr. Pamela Isley (Uma Thurman) nel film *Batman and Robin* (1997) con il suo alter-ego Poison Ivy. Isley ha tutte le caratteristiche della pazza: paranoica, ossessiva compulsiva con illusioni di grandezza che la fanno trasformare in Ivy per punire il mondo. Isley porta il camice bianco ed occhiali spessi con la montatura nera (ora di gran moda) ma quando si trasforma in Ivy, assume fattezze di una bellezza stratosferica, divertente ma irreali. In *Sfera* (1998), la Dr. Elizabeth Halperin (Sharon Stone) è una scienziata pazza, non tanto cattiva o maniacale, quanto instabile sia emozionalmente che psicologicamente. Infine, in *Blue Profondo* (1999) è la volta di Dr. Susan McCallister (Saffron Burrows), medico-biologa fuori controllo.

Dal 1950 il numero di scienziate nella vita reale aumenta, e conseguentemente il numero di scienziate nel cinema. Nelle serie di TV di lunga durata come *Star Trek*, *CSI: Crime Scene Investigation* (Las Vegas, Miami, e New York) e anche *Bones*, la parità di presenze è, probabilmente, dovuta alla necessità di costruire storie più variegata e, quindi, di maggior interesse per il pubblico.

Alcuni stereotipi riservati alle sole scienziate hanno un chiaro significato vessatorio [4]. Cominciamo da quello più comune: la **scienziata vecchia zitella**. Nella maggioranza dei casi, questo stereotipo non si applica necessariamente a donne di una certa età, ma bensì a scienziate giovani anagraficamente ma che si creano questo cliché. Naturalmente, quando arriva l'uomo della vita, da essere delle vere professioniste maniache e trascurate diventano perfette, attraenti, desiderabili. Nel riacquisire la femminilità però perdono la professionalità. Quindi intelligenza e femminilità sono caratteristiche che si escludono a vicenda. Esempi di questa incompatibilità sono la Dr. Constance Peterson (Ingrid Bergman) in *Io ti salverò* (1945) fig. 8, la Dr. Margaret Ford (Lindsay Crouse) in *La casa dei giochi* (1987) oppure la Dr. Grace Augustine (Sigourney Weaver) in *Avatar* (2009).

Un secondo stereotipo molto comune è quello della **scienziata maschiaccio**. Anche in questo caso il cliché è devastante: dure, rudi, bestemmiano con facilità e hanno abitudini non proprio salutari (fumano, bevono, si drogano, dormono poco e male...), si vestono in modo pratico ed androgino. Rimane soltanto l'intuito femminile che molto spesso consentirà loro di trovare la soluzione al problema.



Fig. 8

Come quello della vecchia zitella, anche questo archetipo perpetua l'idea dell'incompatibilità tra scienza e donna. La Dr. Ruth Leavitt (Kate Reid) in *Andromeda* (1971) è un chiaro esempio del maschiaccio, così come Dr. Grace Augustine (Sigourney Weaver) in *Avatar* (2009).

Uno stereotipo positivo è quello della **scienziata solitaria**. Questo archetipo lo troviamo in film più recenti. La scienziata solitaria è una ricercatrice eccellente, decisamente superiore ai suoi colleghi

uomini; è la più competente nel suo campo, è moderna, emancipata, e, soprattutto, è totalmente dedicata alla sua ricerca. Troviamo in lei i tratti più positivi della scienza: curiosità infinita, infaticabilità, modestia, moralità e visione (*Sie müssen Visionen haben* era la risposta del direttore del laboratorio dove ho fatto il mio primo post-doc quando dicevo che un certo esperimento non era fattibile). Infine, è carina, gradevole e irrealisticamente giovane. Ma (c'è sempre un ma) non è riconosciuta professionalmente dai suoi capi e, come la zitella, necessita dell'aiuto e del sacrificio dei suoi colleghi uomini. Come quintessenza della scienziata solitaria possiamo considerare Dr. Eleonore Arroway (Jodie Foster) in *Contact* (1997) e Dr. Ryan Stone (Sandra Bullock) in *Gravity* (2013), che, addirittura, rimane sola nell'immensità dell'Universo.

Più che uno stereotipo, quello della **assistente** è stato il ruolo assegnato da Hollywood per anni alle scienziate. Una scienziata, insomma, che fa le veci della segretaria, dell'aiuto laboratorio. Spesso è la figlia/moglie/amante dello scienziato che, ovviamente, ha il ruolo principale nel film. Esempi di questo archetipo non ne mancano: *Assalto alla Terra* (1954), *Il sipario strappato* (1966), *Jurassic Park* (1993).

Lo stereotipo della **scienziata ingenua** vuole essere positivo: si tratta di una donna brillante, bella, di morale integra, ricercatrice eccellente nel suo campo ma purtroppo molto ingenua, che necessita dell'aiuto dell'uomo per tirarsi fuori dai guai. Lo sono: Dr. Sara Harding (Julianne Moore) in *Il mondo perduto-Jurassic Park* (1997), oppure Dr. Elisabeth Shaw (Noomi Rapace) in *Prometheus* (2012), figure che uniscono allo stereotipo della scienziata ingenua anche quello dell'avventuriera.

Per ultimo un ulteriore stereotipo negativo: la **scienziata cospiratrice**, ovviamente cattiva. Questo archetipo è l'antitesi della scienziata ingenua perché egoista, capace di allearsi con le forze del male, corrotta; bella, ma capace di sfruttare la propria bellezza e sessualità per ottenere quello che vuole. Più che uno stereotipo di scienziata sembra un vero cliché di donna calcolatrice. La Dr. Elsa Schneider in *Indiana Jones e l'ultima crociata* (1989) è un chiaro esempio di cospiratrice.

Tutti questi stereotipi fanno parte del folklore della nostra cultura. Come tutti i miti riducono a caratteri semplici idee complesse e paure che si perpetuano nel tempo. Gli stereotipi delle scienziate sono cambiati nel corso della storia seguendo i cambiamenti sociali. Se nel

1961 in Inghilterra la percentuale di chimiche, fisiche e biologhe era di circa il 7% [7] ora va oltre il 28%, ed è ovvio che questo si rispecchia nel cinema e nella letteratura. Spesso le scienziate nei film sono donne che hanno raggiunto l'apice della carriera, quindi: prime ricercatrici, dirigenti di ricerca o professoressine ordinarie. Sono delle vere eroine. Hanno grandi capacità mentali, sono resistenti emozionalmente, creative, di elevata morale, coraggiose, altamente competenti e qualificate. Sono anche improbabilmente giovani e la loro qualità più evidente è, anche, la più superficiale: la straordinaria bellezza. Spesso vengono dipinte come persone sole, che devono scegliere tra la professione e la vita familiare o sentimentale. Le poche scienziate con famiglia che appaiono nei film, spesso non sono brave mamme. Non sono presenti in casa e non fanno abbastanza per i loro figli e/o figlie. Questo, probabilmente, è lo stereotipo che dobbiamo combattere maggiormente, quello più dannoso e più facile da trasferire alle ragazze: il successo in STEM ha un caro prezzo, la mancata vita familiare. Tempo fa il marchio di shampoo Pantene fece una pubblicità molto interessante che ha avuto però una vita corta. Mostrava uomini e donne in chiaro ruolo dirigenziale e paragonava come in un uomo certe attitudini siano positive mentre in una donna altamente negative. L'uomo è un vero leader, la donna è una kapò; l'uomo è dedicato, la donna è egoista; l'uomo è elegante, la donna vuole impressionare (sempre e quando non venga accusata di usare la sua sessualità per ottenere vantaggi). Questo vale per qualunque professione, ma purtroppo calza a pennello nel caso della scienza.

Non concordo con Eva Flicker [4] e neppure con Rosslyn Haynes [3] quando affermano che gli stereotipi classici degli scienziati non valgono per le scienziate, in particolare quello dello **scienziato pazzo**. Concordo sul principio che l'immaginario collettivo si auto-perpetua, e rinforza le supposizioni culturali e sociali per giustificare la mancata parità, in particolar modo, nelle discipline STEM. La scienziata STEM nel cinema è una specie non in via di estinzione ma certamente in pericolo. Appare in un rapporto di 1 a 7 rispetto al genere maschile, il 9% appartengono a discipline ingegneristiche, il 17% a tecnologia e il 12% a scienze fisiche e della vita [8]. Utilizzando le parole di Geena Davis, se vogliamo avere più donne in STEM, bisogna che la percentuale di scienziate nei film incrementi. Aggiungo di mio, presumibilmente in ruoli credibili e senza essere una dea dell'Olimpo, altrimenti l'immagine della scienziata diventa un mito irraggiungibile per i poveri mortali.

## Bibliografia

- [1] Christopher Frayling, "Mad, bad and dangerous? The Scientist and the Cinema" (Reaktion Books) 2005.
- [2] Rosslyn Haynes, "From Faust to Strangelove: Representations of the Scientist in Western Literature" (Johns Hopkins University Press) 1994.
- [3] Rosslyn Haynes, "From Madman to Crime Fighter" (Johns Hopkins University Press) 2017.
- [4] Eva Flicker, "Between brains and breasts - women scientists in fiction films: on the marginalization and sexualization of scientific competence", *Public. Understand. Sci.*, 12 (2003) 307.
- [5] Jocelyn Steinke, "Cultural representations of gender and science", *Sci. Commun.*, 27 (2005) 27.
- [6] Sidney Perkowitz, "Female scientist on the big screen", *The Scientist*, 21 July (2006).
- [7] Robert A. Jones, "How many female scientist do you know?", *Endeavour*, 29 (2005) 84.
- [8] Geena Davies Institute on Gender in Media (see [jane.org](http://jane.org)).

Silvia Soria

Silvia Soria ha ricevuto la laurea e il dottorato in Fisica all'Università di Barcellona, Spagna, rispettivamente nel 1994 e nel 1999. In passato, ha lavorato come ricercatrice post-doc presso il Laser Laboratorium Goettingen e.V., Germania; come ricercatrice Ramon y Cajal presso l'ICFO-Institute of Photonics Science a Barcellona, Spagna, ed infine come ricercatore junior presso il Centro Studi e Ricerche "E. Fermi". Attualmente è ricercatrice permanente presso l'IFAC - Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", del CNR e professore abilitato in fisica applicata. Le sue aree di ricerca includono laser, ottica non lineare, materia soffice e biofotonica.

# INTERVISTA A CATHERINE LANGLAIS

## Spazio bambino al 104° Congresso SIF

Grazie alla proposta del Comitato Pari Opportunità (CPO) della SIF e alla pronta risposta della sede congressuale dell'Università della Calabria ad Arcavacata di Rende, quest'anno al Congresso SIF si offre un supporto concreto agli iscritti con bambini sino ai 12 anni.

Sarà infatti attivo il servizio SPAZIO BAMBINO, che accoglierà i bambini durante i lavori del congresso. La struttura è munita di uno splendido parco giochi all'esterno e il corpo docente è tutto altamente qualificato.

Il servizio sarà gratuito e offerto da CPO-SIF & "Scuola dell'infanzia Passi d'oro - UNICAL"

Questa iniziativa del CPO nasce per favorire la partecipazione al congresso dei genitori, e in particolare delle madri, di bambini piccoli.

L'argomento è estremamente importante, poiché la partecipazione ad una conferenza, nei vari suoi aspetti, è senz'altro da ritenere parte integrante dell'attività scientifica e della costruzione della propria carriera.

Chi ha bambini piccoli si trova spesso a dover rinunciare a presentare il proprio lavoro ad una conferenza, a ridurre al minimo il tempo di presenza ai lavori o addirittura a non parteciparvi, per non lasciare i figli.

Questo va a discapito della formazione, della crescita scientifica che ci è data dal confronto e dalla discussione con i colleghi, possibile a volte solo proprio in ambito di conferenze e workshop. Con questa offerta, che rientra appieno negli obiettivi del CPO-SIF, vogliamo sensibilizzare la comunità scientifica a questo argomento e dare un supporto concreto alle colleghe e ai colleghi che potranno partecipare serenamente ai lavori del 104° Congresso SIF con i loro bambini.

Il CPO della SIF continuerà ad impegnarsi su questo aspetto, sensibilizzando e incoraggiando Enti di Ricerca e Associazioni Scientifiche che organizzano conferenze nazionali e internazionali in Italia, a fornire supporti analoghi.

Per usufruire del servizio è necessario seguire le indicazioni per la richiesta al link <https://www.sif.it/static/SIF/resources/public/files/richiesta-spazio-bimbo.pdf>

Sara Pirrone  
Presidente CPO-SIF

Catherine Langlais is President of the SFP (Société Française de Physique – French Physical Society). On the occasion of a newly strengthened collaboration between the SFP and the SIF (Società Italiana di Fisica – Italian Physical Society), concerning the establishment of the Friedel-Volterra Prize and of joint initiatives such as the one on "Physics for Development", an interview with President Catherine Langlais is presented here below.



## A WOMAN OF SCIENCE AND A LEADER WITHIN A LARGE INDUSTRIAL COMPANY

**Catherine Langlais, you are deputy director of the R&D department of Saint-Gobain, a prestigious and challenging professional position. How did you become interested in sciences?**

In high school, I was interested as much in the humanities as in sciences. When the most prestigious Faculty of Engineering, the "École Polytechnique", allowed the access to women in 1972, Anne Chopinet<sup>1</sup> was admitted and this pushed me to try to do the same. I thought I could practice a profession in sciences while keeping the literature for my spare time, the opposite being more difficult. The following year, I went to the "École des Mines" of Nancy where I became an engineer. To motivate young people to engage into sciences, I strongly believe in the strength of models just as much as Anne Chopinet was for me. Also, when I held positions of responsibility, I have always strived to be an example, to show researchers that women can excel in sciences and take up careers quite similar to those of men, while having children, if they wish, and a happy private life.

**Which path led you to the research on materials at Saint-Gobain?**

Since the years at the *École des Mines*, I have become interested in renewable energies. I spent the last part of my studies analyzing solar houses at the CNRS<sup>2</sup> laboratory in Odeillo, where the huge solar oven is equipped with mirrors manufactured by Saint-Gobain. Then I spent a year at Stanford University in California to get a Master in Mechanical Engineering. When I returned to France, solar energy had not been developed enough to allow me to find a job there and then I remembered the well-performing mirrors at Saint-Gobain. So I applied for a job in this company, attracted by their research on building insulation. I was hired as a young researcher at Isover, a subsidiary of Saint-Gobain. My first studies were devoted to understanding heat and mass transfer within fibrous insulators. These works, which led me to set up several collaborations with French academic laboratories specialized in porous media, pursued very concrete industrial goals. I thus discovered one of the greatest satisfactions that industrial research can provide: having to find a solution to applied

<sup>1</sup> One of the first seven women admitted at the *École Polytechnique*.

<sup>2</sup> *Conseil National de la Recherche Scientifique*.





problems, relying on a very thorough scientific understanding of them.

I spent twenty years at the Isover R&D center in France. I appreciated the various positions that were offered to me: team leader, project manager, department manager, etc. I took care with joy of the education of my two children during this period. My husband has always shared with me the daily tasks. I would never have had this career if he had not helped and supported me. In all these years, I have learnt that the quality of the time you spend with your family is more important than its quantity. I invested a lot in my work, while I learnt to accept that perfection is not always possible! I was then appointed Director of the Research Center of Saint-Gobain in Aubervilliers where I spent eleven years, before taking my current role. During these eleven years and thanks to the work of all the teams, the perimeter of the Center has expanded and its activities, which historically concerned "glass", have been extended to all those of the group (in particular plaster, concrete and habitat in general). In this growth context, the workforce has grown from 270 to more than 400 people and I was able to contribute to make teams more international (the proportion of foreign researchers rising from a few percent to about 23%) and to the inclusion of more women (29% to 36%).

### **What are your main appointments and responsibilities?**

Since 2011, I have been in charge, in particular, of the coordination of the network of the major research centers of Saint-Gobain (three in Europe, one in the USA, one in India and one in China), so as to offer a coherent and effective model to the different "businesses". I also coordinate some cross-cutting research programs concerning material science.

From 2010 to 2013, I was Vice President of the High Council for Science and Technology, with the task of enlightening the government on all matters relating to the broad guidelines of the nation, in terms of scientific research policy, transfer of technology and innovation. We submitted several reports that did not always have the echo we wished for! For twenty years I have also been a member of the Roberval Prize, prize for books and technology communication, which has the objective of fostering the development of a francophone technological culture. Finally, since 2013, I have been part of the Academy of Technology.

### **Who were your mentors or models during this brilliant career?**

My mentors were men who believed in me and have offered me greater and greater responsibilities. I owe them a lot. I did not really have any female model during those years when I was surrounded basically by men. I have progressed throughout my career thanks to the people around me, who inspired me with good examples and identifying the bad ones! I often say that I learnt as much from my teams as from my superiors.

Every leader, male or female, has his/her own style and I'm not sure there's a specific recipe for leading a team. For my part, if I had to list some ingredients, they would be: to have a clear vision of the project and to share it with the team; to listen to others and to help them to succeed; to give a positive example by working hard and striving to reach the excellence; to remain true to yourself knowing your weaknesses and strengths; to love your job and to do it with pleasure.

### **What are your relations with academic research?**

I did science in industry, but always in close connection with the academic world, and in a context of great diversity. Saint-Gobain has several mixed units with the CNRS, including that of Aubervilliers. The directors of the research of Saint-Gobain I have known have always given great importance

to academic collaborations and to training through research. In Aubervilliers, 80% of our researchers have a thesis. Since the end of the 1970s, the managers of the Saint-Gobain centers have been encouraged to hire PhDs.

Saint-Gobain also has several Chairs in France (*X-ESPCI, École des Ponts, INSA Lyon, Nancy Mines*). I have myself contributed to the establishment of an international network of academic partners (Saint-Gobain University Network) whose ambition is twofold: to identify the best international teams in order to collaborate with them, and to make use of these partnerships in order to recruit talented students after their thesis on disciplines of interest for Saint-Gobain. I have always enjoyed meeting and interacting with teams from different continents and of different education. Diversity is a great wealth which brings innovation.

### **What were your motivations for the presidency of the SFP?**

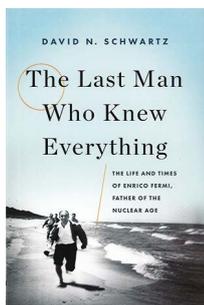
I am not a doctor in physics, but I have always been interested in physics and its applications. For nearly forty years, I have interacted with great pleasure with many physicists. Concerning SFP's presidency, I was encouraged to accept cordial invitation of Michel Spiro<sup>3</sup> by Didier Roux and Jean-Claude Lehmann, who have both joined Saint-Gobain after a career at the CNRS and who are familiar with the complementarity of the two environments.

As for my action at the SFP, I know that I can rely on a friendly and solid team with which I will be able to establish a roadmap. Inspired by the work of my predecessors, I intend to ensure continuity and to capitalize the recognized assets of the Society. Throughout my working path, I think that the links of the SFP with industry could be reinforced (for example by the insertion of young PhD students) and I will focus, in particular, on continuing the actions taken to attract young people, especially young women, towards careers in science (Olympiads, "*Mains à la pâte*"...). Finally, my primary concerns are and will be to develop the image and the visibility of the SFP abroad and to attract young members.

Véronique Pierron-Bohnes  
CNRS researcher and former President of the "Femmes et Physique" commission at SFP  
Translated from *Reflets de la Physique*, n° 52 (February 2017) pp. 38-39.

<sup>3</sup> Former SFP President.

# RECENSIONI



DAVID N. SCHWARTZ

THE LAST MAN WHO KNEW EVERYTHING  
THE LIFE AND TIMES OF ENRICO FERMI, FATHER OF THE NUCLEAR AGE

Basic Books, New York, 2017

hardcover: pp. 480; \$ 35.00

e-book: \$19.99

Di prossima pubblicazione la traduzione italiana dall'editore Solferino

Publicata online  
23 luglio 2018

Recensione di  
F. Guerra, N. Robotti

## ULTIMI VOLUMI PUBBLICATI



“Ettore Majorana Scientific Papers”  
edited by the Council of the Italian  
Physical Society  
second edition  
80 years after Majorana's disappearance  
pp. XLVII + 284, € 70,00; SOCI SIF € 49,00

Lecture Notes  
Joint EPS-SIF International School on Energy  
“Advances in Basic Energy Issues”  
edited by L. Cifarelli, F. Wagner



Per consultare l'elenco completo dei libri e delle collane SIF:  
<https://www.sif.it/libri/>

Per informazioni su prezzi e disponibilità scrivere a: [subscriptions@sif.it](mailto:subscriptions@sif.it)

## IN RICORDO DI

**Oscar Saavedra**

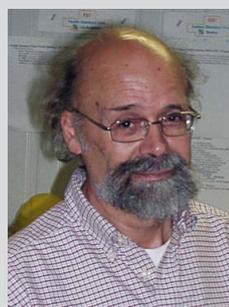


La Paz (Bolivia) 29 giugno 1940 -  
Bonvicino (CN), 8 aprile 2018

P. Galeotti

Publicato online  
16 maggio 2018

**Alberto Benvenuti**



Firenze, 10 ottobre 1940 -  
Minneapolis (MN), 15 aprile 2018

G. Bruni, F.-L. Navarra

Publicato online  
23 luglio 2018

## STAMPARE LE LENTI

Ricercatori della Northwestern University hanno messo a punto, in due anni di lavoro, un nuovo metodo per realizzare lenti velocemente, a basso costo e di buona qualità usando una stampante 3D. La lente "custom design", di 5 mm di diametro e 3 mm di altezza, si realizza in 4 ore. Nelle prime prove gli strati depositati uno sull'altro mostravano gradini di 5  $\mu\text{m}$ , ovviamente eccessivi per una buona qualità ottica. La soluzione trovata è un processo a due fasi che produce una superficie otticamente liscia, senza allungare il tempo di realizzazione. L'articolo mostra i test di risoluzione spaziale e foto fatte inserendo la lente in un iPhone.

Xiangfan Chen et al., *High-Speed 3D Printing of Millimeter-Size Customized Aspheric Imaging Lenses with Sub 7 nm Surface Roughness*, *Advanced Materials*, 30 (2018) 1870123.

Advancements in three-dimensional printing technology have the potential to transform the manufacture of customized optical elements, which today relies heavily on time-consuming and costly polishing and grinding processes. However, the inherent speed-accuracy trade-off seriously constrains the practical applications of 3D-printing technology in the optical realm. In addressing this issue, here, a new method ... is reported... The work demonstrated here elucidates the unprecedented potential of 3D printing techniques for optical applications, which will further lead to a plethora of novel devices with a tremendous impact on freeform optics and biomedical imaging.



La lente "stampata", riprodotta con permesso da <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201870123?af=R>  
© Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

## IL PERIELIO DI MERCURIO INSEGNA ANCORA

L'avanzamento anomalo (rispetto alla meccanica di Newton) del perielio di Mercurio (0.012°/secolo) ha fornito storicamente il primo banco di prova per le teorie relativistiche della gravitazione. Clifford Will ha ora calcolato effetti di gravità generale molto più piccoli dovuti sia agli altri pianeti e sia alle correnti di massa, che

dovrebbero dar luogo ad un'ulteriore precessione di  $2 \times 10^{-8}$  °/secolo. Attualmente non è misurabile, ma lo potrebbe essere presto.

Clifford M. Will, *New General Relativistic Contribution to Mercury's Perihelion Advance*, *Phys. Rev. Lett.*, 120 (2018) 191101.

We point out the existence of a new general relativistic contribution to the perihelion advance of Mercury... It arises in part from relativistic "cross-terms" in the post-Newtonian equations of motion between Mercury's interaction with the Sun and with the other planets, and in part from an interaction between Mercury's motion and the gravitomagnetic field of the moving planets. At a few parts in  $10^6$  of the leading general relativistic precession of 42.98" per century, these effects are likely to be detectable by the Bepi Colombo mission to place and track two orbiters around Mercury, scheduled for launch around 2018.

## LENTE DI PLASMA PER VEDERE LA VEDOVA NERA

Le onde radio emesse dalle pulsar sono distorte dal materiale che attraversano. Ma non sempre a far danno. In circostanze favorevoli infatti, l'effetto è una focalizzazione della radiazione che aumenta la luminosità della pulsar rendendone visibili dettagli, come quando essa è eclissata dall'emissione ionizzata del compagno.

Robert Main et al., *Pulsar emission amplified and resolved by plasma lensing in an eclipsing binary*, *Nature*, 557 (2018) 522.

Radio pulsars scintillate because their emission travels through the ionized interstellar medium via multiple paths, which interfere with each other. It has long been realized that the scattering screens responsible for the scintillation could be used as "interstellar lenses" to localize pulsar emission regions. Most scattering screens, however, only marginally resolve emission components, limiting results to statistical inferences and detections of small positional shifts. Since screens situated close to the source have better resolution, it should be easier to resolve emission regions of pulsars located in high density environments such as supernova remnants or binaries in which the pulsar's companion has an ionized outflow. Here, we report events of extreme plasma lensing in the "Black Widow" pulsar, PSR-B1957+20, near the phase in its 9.2 hour orbit in which its emission is eclipsed by its companion's outflow. ...The strongest events clearly resolve the emission regions.

## UNA PERFETTALENTE GRAVITAZIONALE

Quando due galassie si trovano sulla stessa linea di vista, la curvatura dello spazio provocata da quella più vicina (lente) piega la luce emessa da quella più lontana facendola apparire come un anello perfetto. Misurandolo (con Hubble Space Telescope) si ricava la curvatura. La galassia ESO 325-G004 è abbastanza vicina (circa 150 Mpc) da poterne valutare la massa misurando la dispersione delle velocità delle sue stelle (col VLT in Cile). È stata così testata la Relatività Generale fuori della galassia, su scala dei chiloparsec.

Thomas E. Collet et al., *A precise extragalactic test of General Relativity*, *Science*, 360 (2018) 1342.

General Relativity has been precisely tested on Solar System scales, but the long-range nature of gravity is still poorly constrained. The nearby strong gravitational lens ESO 325-G004 provides a laboratory to probe the weak-field regime of gravity and measure the spatial curvature generated per unit mass,  $\gamma$ . By reconstructing the observed light profile of the lensed arcs and the observed spatially resolved stellar kinematics with a single self-consistent model, we conclude that  $\gamma = 0.97 \pm 0.09$  at 68% confidence. Our result is consistent with the prediction of 1 from General Relativity and provides a strong extragalactic constraint on the weak-field metric of gravity.

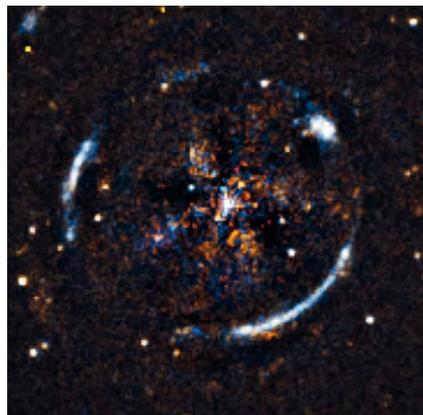


Immagine composta degli archi della sorgente attraverso la lente gravitazionale, dopo sottrazione della luce di primo piano. Crediti: ESO, ESA/Hubble, NASA.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC ISOTOPE SEPARATORS AND RELATED TOPICS

# EMIS XVIII

CERN GENEVA / SWITZERLAND / 16 - 21 SEPTEMBER 2018

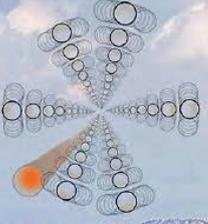


<https://indico.cern.ch/event/616127/>

The 8<sup>th</sup> International Conference  
Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena

# CHANNELING 2018

September 23 - 28, 2018 Ischia (NA), Italy



Hotel **Continental Ischia**  
★★★★



**Chairmen**  
S.B. Dabagov  
L. Palumbo  
F. Zimmermann



<http://www.Inf.infn.it/conference/channeling2018/>

# Hard Probes 2018 Aix-Les-Bains, Savoie, France 1-5 October 2018



<https://indico.cern.ch/event/634426/>

**EJC2018**  
Joliot-Curie

## CORRELATIONS BETWEEN PARTONS IN NUCLEAR SYSTEMS

OCTOBER 7-12, 2018  
LA GRANDE MOTTE, FRANCE

Conception: CNRS Nucleonics/Physics, Mikheev, Astashev  
Credit photos: © CERN for the benefit of the ALICE Collaboration - © Jefferson Lab

<https://ejc2018.sciencesconf.org/>

|            |  |
|------------|--|
| <b>G S</b> | <b>GRAN SASSO<br/>SCIENCE INSTITUTE</b>                              |
| <b>S I</b> | <b>SCHOOL OF ADVANCED STUDIES<br/>Scuola Universitaria Superiore</b> |

# Nuovi orizzonti di una Scienza in divenire

25-26 OTTOBRE 2018

ASTROFISICA  
BIOLOGIA  
COMPLESSITÀ

<http://www.gssi.infn.it/seminars/seminars-and-events-2018/item/2327-nuovi-orizzonti-di-una-scienza-in-divenire>

# physicsworld

## Digital issues now freely available to SIF members

Download the free *Physics World* app for access. Available for iPhone, iPad and all Android devices.



Authenticate your access at [members.sif.it](https://members.sif.it)



IOP Publishing and Società Italiana di Fisica wish to thank *brightrecruits* for facilitating digital access to *Physics World* for SIF members in 2018. **brightrecruits**

DOMANDA DI ISCRIZIONE alla SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA  
ITALIAN PHYSICAL SOCIETY MEMBERSHIP APPLICATION FORM

2018

Nome \_\_\_\_\_  
Name

Cognome \_\_\_\_\_  
Surname

Luogo e data di nascita \_\_\_\_\_  
Place and date of birth

Nazionalità \_\_\_\_\_  
Nationality

**a** Istituto o Ente di appartenenza \_\_\_\_\_  
Affiliation

**b** Indirizzo privato \_\_\_\_\_  
Home address

Indirizzo e-mail \_\_\_\_\_  
E-mail

Breve curriculum (titolo di studio, attività didattica e scientifica): \_\_\_\_\_  
Brief scientific curriculum:

Indirizzo a cui inviare il Bollettino della Società e la corrispondenza:  
Address where Bulletin and Society communications are to be sent:

**a**

**b**

Firme leggibili dei Soci Presentatori (\*)  
Signatures of two introducing Members

Nomi in stampatello e indirizzi e-mail  
Names in block letters and e-mail addresses

1) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Socio INDIVIDUALE € 45,00   
INDIVIDUAL Member

Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale) € 25,00   
JUNIOR Member under 30 (one year payment)

Socio JUNIOR al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale 2018-2019-2020) € 60,00   
JUNIOR Member under 30 (three year payment 2018-2019-2020)

Socio SENIOR al di sopra dei 70 anni € 35,00   
SENIOR Member over 70

Socio INDIVIDUALE anche membro di altre associazioni scientifiche italiane relative alla fisica (\*) € 35,00   
INDIVIDUAL Member also member of other Italian scientific associations (\*\*)

Socio COLLETTIVO € 260,00   
COLLECTIVE Member

Socio SOSTENITORE (a partire da) € 310,00   
SPONSORING Member (starting from)

La quota di iscrizione dovrà essere pagata dopo aver ricevuto comunicazione dell'accettazione della domanda. (\*)  
Applicants will have to pay the membership dues only AFTER having been informed by the Society of the acceptance of their application. (\*)

(\*) Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

(\*) Information: <https://en.sif.it/association>

Data \_\_\_\_\_  
Date

Firma \_\_\_\_\_  
Signature

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del D.Lgs. 196/2003  
I hereby authorize the treatment of my personal data according to the privacy law D.Lgs. 196/2003  
sì/yes  no

# SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

## Per diventare Socio SIF:

Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

### Quote sociali 2018 della Società Italiana di Fisica

- |  |          |                          |
|--|----------|--------------------------|
| <input type="radio"/> Socio Individuale  | € 45,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento annuale)   | € 25,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Junior al di sotto dei 30 anni (pagamento triennale 2018-2019-2020)                          | € 60,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Senior al di sopra dei 70 anni   | € 35,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Individuale anche membro di altra associazione scientifica italiana relativa alla fisica (*) | € 35,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Collettivo   | € 260,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Sostenitore (a partire da)   | € 310,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF)   | € 10,00  | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio Invitato (*) - primo anno di pagamento (quota SIF+EPS)                                       | € 20,00  | <input type="checkbox"/> |

(\*) Informazioni: <https://www.sif.it/associazione>

## Per diventare Socio EPS:

Informazioni: <https://www.eps.org/subscribe>

### Quote sociali 2018 della Società Europea di Fisica per "Individual membership"

- |  |         |                          |
|--|---------|--------------------------|
| <input type="radio"/> Socio                          |         |                          |
| <input type="radio"/> Socio al di sotto dei 30 anni  | € 27,50 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Socio in pensione              | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Studente                       | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
| <input type="radio"/> Insegnante (pre-universitario) | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |
|  | € 20,00 | <input type="checkbox"/> |

## Modalità di pagamento della quota sociale alla SIF:

- online a mezzo carta di credito, tramite collegamento diretto e sicuro (POS) con la banca BNL, attraverso l'Area Soci del sito web della Società Italiana di Fisica
- a mezzo bonifico:  
BancoPosta, IBAN IT14 G076 0102 4000 0001 9197 409  
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.
- a mezzo versamento sul c/c postale n. 19197409  
intestato a: Il Nuovo Cimento - Società Italiana di Fisica S.I.F.
- a mezzo carta di credito, tramite la Società Italiana di Fisica, compilando e spedendo il modulo sottostante (\*\*)

(\*\*) In questo caso sono escluse le carte Diners e American Express.

Compilare e spedire a : **Società Italiana di Fisica - Via Saragozza 12 - 40123 Bologna - fax 051 581340**

Il sottoscritto: \_\_\_\_\_

Nato a: \_\_\_\_\_ il \_\_\_\_\_

Residente a: \_\_\_\_\_

Via: \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_

Documento di riconoscimento: \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_

Rilasciato da: \_\_\_\_\_ il \_\_\_\_\_

Titolare carta di credito **VISA** n. \_\_\_\_\_

Scadenza \_\_\_\_\_

Titolare carta di credito **MASTERCARD** n. \_\_\_\_\_

Scadenza \_\_\_\_\_

### AUTORIZZA

La Società Italiana di Fisica

A prelevare dalla carta di credito sopra descritta

L'importo di € \_\_\_\_\_ , \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ )  
(importo in cifre) (importo in lettere)

Data \_\_\_\_\_

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del D.Lgs. 196/2003

sì  no

Firma \_\_\_\_\_

# Migliora le prestazioni del tuo laboratorio



## AWG

a partire da meno di

EUR 4.950

per canale

- 2,4 GSa/s, 16 bit, 750 MHz
- 4, 8 e più canali
- <50 ns di latenza di trigger

### Applicazioni tipiche

Test di semiconduttori, quantum computing, progettazione e test di radar ad array, lidar, spettroscopia, NMR

## Analizzatori d'impedenza

a partire da

EUR 9.300

- Da DC a 5 MHz, da 1 mΩ a 1 TΩ
- Accuratezza di base dello 0,05%
- Advisor per la compensazione e indicatori livello di fiducia

### Applicazioni tipiche

Dielettrici «high-Q», sensori capacitivi, supercondensatori, materiali fotovoltaici, caratterizzazione di componenti

## Lock-in Amplifier

a partire da

EUR 5.200

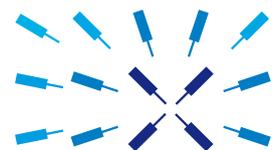
- Fino a 600 MHz
- Oscilloscopio, FFT, FRA, Sweeper, Strumento imaging
- Opzioni: AWG, PID, PLL, Boxcar, Contatore, AM & FM

### Applicazioni tipiche

AFM, LVP, CARS, SRS, SNOM, grafene, PLL ottica, THz, pump-probe, RFID, MEMS, NEMS, giroscopi, NDT, MRFM

## Software

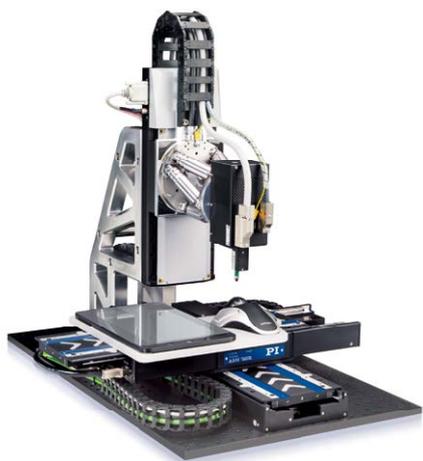
Tutti gli strumenti sono equipaggiati con LabOne®, il software di controllo di Zurich Instruments, con il suo ricco toolset, il suo approccio efficiente e la sua facilità di utilizzo. Gli strumenti possono essere controllati da qualunque browser o integrati in programmi LabVIEW, MATLAB, Python, C e .NET.



Zurich  
Instruments

# Tecnologia in Movimento

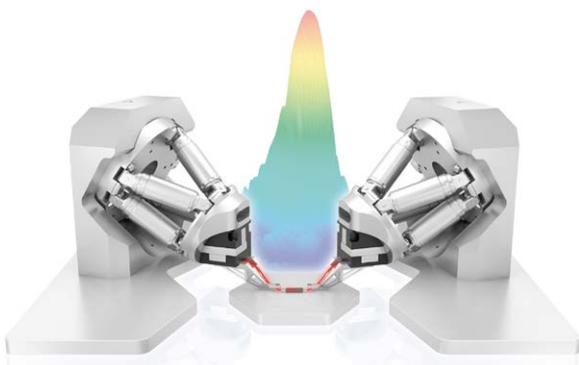
PRECISIONE, AFFIDABILITA' ED INNOVAZIONE



Controlled by  
**ACS**

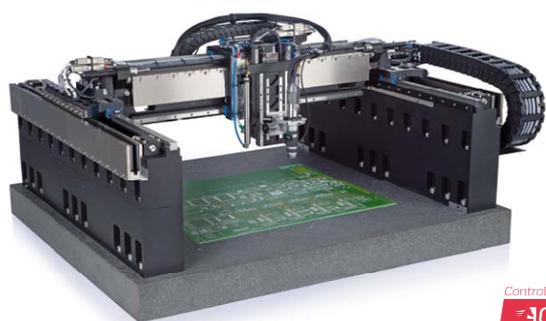
## Automazione Integrata

- + Configurazione a 10 assi
- + Motori lineari che garantiscono un rapido posizionamento in XY
- + Hexapod in grado di eseguire posizionamenti altamente precisi
- + Attuatore voice coil per movimentare il sensore
- + Interfaccia EtherCAT



## Allineamento di Fibre ad Alta Precisione

- + Routine integrate per allineamento di fibre ottiche
- + Misura diretta del segnale ottico
- + Sensori di posizione che garantiscono elevata accuratezza e affidabilità
- + Allineamento automatico di più fibre in <1 sec



Controlled by  
**ACS**

## Produzione e Assemblaggio di Componenti Elettronici

- + Asse verticale con contro bilanciamento pneumatico
- + 508 mm x 508 mm x 155 mm di corsa utile
- + Motori lineari ironless
- + Encoder incrementali lineari per misure dirette della posizione

# Goodfellow

Your global supplier for materials

È possibile scegliere  
fra oltre 70.000 prodotti  
presenti in catalogo

## Research Materials made easy



Metalli



Leghe



Ceramiche



Polimeri



Compositi



Composti

[www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com) | [info@goodfellow.com](mailto:info@goodfellow.com) | 0800 731 4653

Rappresentata in ITALIA da



**PRODOTTIGIANNI**

Our competence, your value.

[www.ricerca.it](http://www.ricerca.it) | [ricerca@prodottigianni.com](mailto:ricerca@prodottigianni.com) | 800 832 027

# NEW Digital Multichannel Analyser Family



## HEXAGON-ONE

Single Input

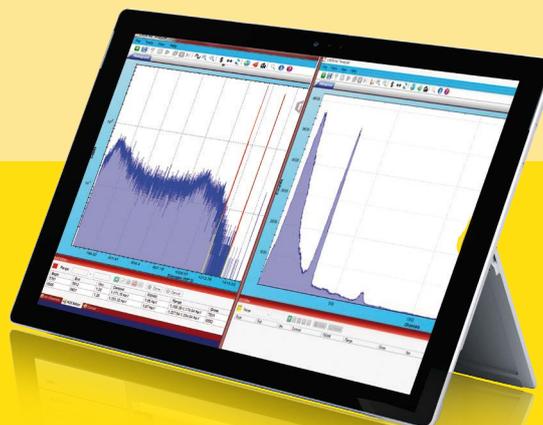


## HEXAGON

Dual Input

### Excellence in $\gamma$ -Spectroscopy

- Single / Dual independent 32 k MCA & Pulse Processor, 16-bit ADC, 100 MS/s
- Ideal for high resolution spectroscopy with HPGe, Silicon and scintillation detectors as NaI and LaBr<sub>3</sub>
- Linux-based embedded CPU for automated operations
- Data logging capabilities (more than 200.000 histograms) via on board SSD
- Pulse height analysis (PHA), time-stamped list mode and multichannel scaler



CHECK THIS OUT!



#### We are waiting for you!

- ✓ **ICHEP 2018**, 39th International Conference on High Energy Physics  
July 4-11 Seoul, Korea
- ✓ **EMIS 2018** - International Conference on Electromagnetic Isotope Separators  
August 16-21 Geneva, Switzerland
- ✓ **EUNPC 2018** - 2018 European Nuclear Physics Conference  
September 2-7 Bologna, Italy
- ✓ **IBAF 2018**  
September 12-28 Nouan-le-Fuzelier, France
- ✓ **SIF** - Congresso Nazionale  
September 17-21 Rende, Italy
- ✓ **TWEPP 2018**  
September 17-21 Anversa, Belgium